

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Grado en Ingeniería de Tecnologías y
Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

ANTENAS MIMO

Autor: Jamil Elían Elías

Tutor: Bazil Taha Ahmed

NOVIEMBRE 2020

ANTENAS MIMO

Autor: Jamil Eliañ Eliañ
Tutor: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
NOVIEMBRE 2020

Resumen

Resumen

Se han diseñado y fabricado dos antenas MIMO. Para ello se ha diseñado primero una antena de un elemento para facilitar el diseño de las antenas MIMO de dos y cuatro elementos. Se han realizado simulaciones y se han comparado con los resultados prácticos y todos sus parámetros S tienen una frecuencia máxima de 20 GHz.

La banda de trabajo como resultado práctico es mejor que la simulación, es decir una frecuencia mínima menor que la teórica, para la antena MIMO de dos elementos su banda de trabajo trabaja desde 3.3 a 20 GHz en el caso teórico y en el caso práctico desde 2.7 hasta 20 GHz, para la antena MIMO de cuatro elementos trabaja desde 2.89 hasta 20 GHz en el caso teórico y en el caso práctico desde 2.24 hasta 20 GHz.

Palabras Clave

MIMO, aislamiento, acoplamiento, parámetros S, adaptación y antenas.

Abstract

Two MIMO antennas have been designed and manufactured. For this, a one-element antenna was first designed to facilitate the design of two and four-element MIMO antennas. Simulations have been carried out and compared with practical results and all its S parameters have a maximum frequency of 20 GHz.

The working band as a practical result is better than the simulation, that is, a minimum frequency lower than the theoretical one, for the two-element MIMO antenna its working band works from 3.3 to 20 GHz in the theoretical case and in the practical case from 2.7 to 20 GHz, for the four-element MIMO antenna it works from 2.89 to 20 GHz in the theoretical case and in the practical case from 2.24 to 20 GHz.

Key words

MIMO, isolation, coupling, S parameters, adaptation and antennas.

Agradecimientos

Quería agradecer enormemente a mi profesor Bazil, donde ha estado siempre allí cuando le necesitaba, por su dedicación en sacar este trabajo adelante conmigo, por su tiempo en cada momento del día cuando le quería preguntar cualquier duda que tenía y por sus conocimientos por haberme enseñado mucho sobre este trabajo.

Pero sobre todo a mis padres a la doctora Khlood Razok Naom y al doctor Elian Elias Mikael por impulsarme a seguir estudiando y nutrirme de conocimientos, a mi coordinador Julian de mi actual empresa por apasionarme por esta carrera maravillosa, a mis amigos por darme la alegría cada día de mi vida, a mis profesores de radiofrecuencia por apasionarme por esta rama de telecomunicaciones.

Muchísimas gracias a todos.

Jamil Elian Elias

Noviembre 2020

Índice general

| | |
|---|------------|
| Índice de Figuras | VII |
| Índice de Tablas | X |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| 2. Conceptos Teóricos | 2 |
| 2.1. Definición de Antena | 2 |
| 2.2. Definición de Antena de Parche | 3 |
| 2.3. Definición de Antena MIMO | 4 |
| 2.4. Adaptación de Impedancias | 5 |
| 2.5. Ancho de Banda | 6 |
| 2.6. Ganancias y Directividad | 6 |
| 2.7. Parámetros S de una Antena | 7 |
| 2.8. Diagramas de Radiación de una Antena | 8 |
| 2.9. Eficiencias de una Antena | 10 |
| 2.10. Tecnología UWB | 10 |
| 3. Criterios y Diseño de Antenas | 12 |
| 3.1. Criterios de Sistema | 12 |
| 3.1.1. Banda de Trabajo | 12 |
| 3.1.2. Adaptación | 12 |
| 3.1.3. Acoplamiento | 12 |
| 3.1.4. Dimensiones | 13 |
| 3.2. Diseño | 13 |
| 3.2.1. Antena de un elemento | 14 |
| 3.2.2. Antena MIMO de dos elementos | 19 |
| 3.2.3. Antena MIMO de cuatro elementos | 24 |
| 4. Resultados Prácticos | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Conclusiones y trabajo futuro | 38 |
| Glosario de acrónimos | 39 |
| Bibliografía | 40 |
| A. Anexo: Planos Polares | 41 |
| A.1. Antena de un elemento | 41 |
| A.2. Antena MIMO de dos elementos | 44 |
| A.3. Antena MIMO de cuatro elementos | 46 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Concepto de Antenas. Imagen recuperada de [1] | 2 |
| 2.2. Antenas Dipolo y Yagi respectivamente. Imágenes recuperadas de [1] | 3 |
| 2.3. Antena de Parche con Alimentación Microstrip. Imagen recuperada de [1] | 3 |
| 2.4. Ejemplo de Antena MIMO de cuatro elementos | 4 |
| 2.5. Ejemplo de Línea de Transmisión. Imagen recuperada de [2] | 5 |
| 2.6. Transformador Taper | 5 |
| 2.7. Cuadripolo Parámetros S. Imagen recuperada de [2] | 7 |
| 2.8. Ejemplo de representación polar. Imagen recuperada de [1] | 8 |
| 2.9. Radiación Isotrópica. Imagen recuperada de [1] | 9 |
| 2.10. Radiación Directiva. Imagen recuperada de [1] | 9 |
| 2.11. Radiación Omnidireccional. Imagen recuperada de [1] | 10 |
| 3.1. Adaptación S_{ii} | 13 |
| 3.2. Acoplamiento S_{ji} | 13 |
| 3.3. Primera aproximación de Antena de un elemento. | 15 |
| 3.4. S11 - Primera aproximación de Antena de un elemento. | 15 |
| 3.5. Antena de un elemento | 16 |
| 3.6. S11 - Antena de un elemento. | 16 |
| 3.7. Diagramas de radiación para un elemento a 4 y 7 GHz respectivamente | 17 |
| 3.8. Diagramas de radiación para un elemento a 10 y 15 GHz respectivamente | 18 |
| 3.9. Diagrama de radiación para un elemento a 19 GHz | 18 |
| 3.10. S11 - Antena de un elemento hasta 50 GHz. | 19 |
| 3.11. Antena MIMO de dos elementos | 20 |
| 3.12. S11 - Antena MIMO de dos elementos. | 21 |
| 3.13. S21 - Antena MIMO de dos elementos. | 21 |
| 3.14. Diagramas de radiación para dos elementos a 4 y 7 GHz respectivamente | 22 |
| 3.15. Diagramas de radiación para dos elementos a 10 y 15 GHz respectivamente | 22 |
| 3.16. Diagrama de radiación para dos elementos a 19 GHz | 23 |
| 3.17. S11 - (Antena MIMO de dos elementos; 50 GHz). | 24 |
| 3.18. S21 - (Antena MIMO de dos elementos; 50 GHz). | 24 |

| | |
|--|----|
| 3.19. Antena MIMO de cuatro elementos | 25 |
| 3.20. S11 - Antena MIMO de cuatro elementos. | 26 |
| 3.21. S21 - Antena MIMO de cuatro elementos. | 27 |
| 3.22. S31 - Antena MIMO de cuatro elementos. | 27 |
| 3.23. S41 - Antena MIMO de cuatro elementos. | 27 |
| 3.24. Diagramas de radiación para cuatro elementos a 4 y 7 GHz respectivamente . . . | 28 |
| 3.25. Diagramas de radiación para cuatro elementos a 10 y 15 GHz respectivamente . . | 29 |
| 3.26. Diagrama de radiación para cuatro elementos a 19 GHz | 29 |
| 3.27. S11 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz). | 30 |
| 3.28. S21 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz). | 30 |
| 3.29. S31 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz). | 31 |
| 3.30. S41 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz). | 31 |
| 4.1. Equipamiento para soldar y medir | 32 |
| 4.2. Aspecto Físico de la Antena de un Elemento | 33 |
| 4.3. S11 de la Antena de un Elemento (Resultado Práctico) | 33 |
| 4.4. Aspecto Físico de la Antena MIMO de dos Elementos | 33 |
| 4.5. S11 de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico) | 34 |
| 4.6. S21 de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico) | 34 |
| 4.7. ECC de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico) | 35 |
| 4.8. La Ganancia de Diversidad de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico) | 35 |
| 4.9. Aspecto Físico de la Antena MIMO de cuatro Elementos | 36 |
| 4.10. S11 de la Antena MIMO de cuatro elementos (Resultado Práctico) | 36 |
| 4.11. S21, S31 y S41 de la Antena MIMO de cuatro elementos (Resultado Práctico) . . | 37 |
| A.1. 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz . | 41 |
| A.2. 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz . | 42 |
| A.3. 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz . | 42 |
| A.4. 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz . | 42 |
| A.5. 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz . | 43 |
| A.6. 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz . | 44 |
| A.7. 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz . | 44 |
| A.8. 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz . | 44 |
| A.9. 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz . | 45 |
| A.10. 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz . | 45 |
| A.11. 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz . | 46 |

| | |
|---|----|
| A.12.4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz . | 46 |
| A.13.4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz | 46 |
| A.14.4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz | 47 |
| A.15.4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz | 47 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Definición de los Parámetros S de este cuadripolo | 8 |
| 3.1. Parámetros del Sustrato. | 14 |
| 3.2. Parámetros de Antena de un elemento primera aproximación. | 15 |
| 3.3. Parámetros de Antena de un elemento. | 16 |
| 3.4. Dimensiones de Antena de un elemento. | 17 |
| 3.5. Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para un elemento. | 17 |
| 3.6. Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para un elemento. | 18 |
| 3.7. Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para un elemento. | 18 |
| 3.8. Parámetros de la Antena MIMO de dos elementos. | 20 |
| 3.9. Dimensiones de Antena MIMO de dos elementos. | 21 |
| 3.10. Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para dos elementos. | 22 |
| 3.11. Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para dos elementos. | 23 |
| 3.12. Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para dos elementos. | 23 |
| 3.13. Parámetros de la Antena MIMO de cuatro elementos. | 26 |
| 3.14. Dimensiones de Antena MIMO de cuatro elementos. | 28 |
| 3.15. Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para cuatro elementos. | 28 |
| 3.16. Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para cuatro elementos. | 29 |
| 3.17. Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para cuatro elementos. | 30 |
| 5.1. Comparación de resultados teóricos con prácticos para las tres antenas. | 38 |
| A.1. Antena de un elemento (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal). | 43 |
| A.2. Antena MIMO de dos elementos (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal). | 45 |
| A.3. Antena MIMO de cuatro elementos (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal). | 47 |

1

Introducción

1.1. Motivación

El impulso que ha llevado al diseño e implementación de estas antenas MIMO es por el gran uso que tienen en nuestro entorno hoy en día, tienen la capacidad de propagar las señales en diferentes caminos por lo que son altamente fiables en cuanto a la transmisión y recepción de la información. Es decir en caso de transmisión de señal con muchos obstáculos por delante ya sean estructuras naturales o fabricadas por el ser humano, esta tecnología por su propagación múltiple, puede llegar a su destino.

Su capacidad de multiplexación le conlleva a distinguir las señales de una misma frecuencia, es decir obtiene todas las señales que recibe el receptor a esa frecuencia y tiene la capacidad de reconstruir la señal utilizando las señales que recibió para así garantizar la recepción a muy alta eficacia.

Por estas características fundamentales que tiene esta tecnología, su utilidad se ha llevado a cabo en muchas redes inalámbricas, ya sea en nuestras antenas Wi-Fi ya sea en el ámbito hogareño, empresarial y en muchos otros, o en nuestros automóviles o dispositivos telefónicos.

1.2. Objetivos

Los objetivos son diseñar y construir las antenas MIMO de dos elementos y cuatro elementos, para conseguirlo se necesita primero diseñar la antena de un elemento, una vez diseñada se desarrollaran las antenas MIMO, se construirá también la antena de un elemento como trabajo adicional.

Otro objetivo son los criterios de la banda de trabajo, que las tres antenas tengan una banda de trabajo que vaya desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz y si es posible, que la banda empieza antes de 3.1 GHz y que sea mayor de 10.6 GHz.

2

Conceptos Teóricos

2.1. Definición de Antena

Según el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), es un elemento radiante y fundamental a la hora de transmitir o recibir señal, dependiendo si es una antena transmisora o receptora, podría transmitir y recibir señal si se tratase de un transceptor. [3]

Es el elemento que se encarga de crear la cobertura necesaria a la hora de enviar información en diferentes puntos del espacio y de recibir esa información, no obstante dependerá mucho de la ganancia que tenga la antena. [3]

Para el caso de la antena transmisora, dependerá también de la potencia que le entregue su generador, a mayor potencia, mayor y mejor sera la cobertura que proporcione. En el caso de la antena receptora, dependerá de su receptor a cuanta sensibilidad tendrá, a mayor sensibilidad, menos potencia de señal llegara a recibir. [4]

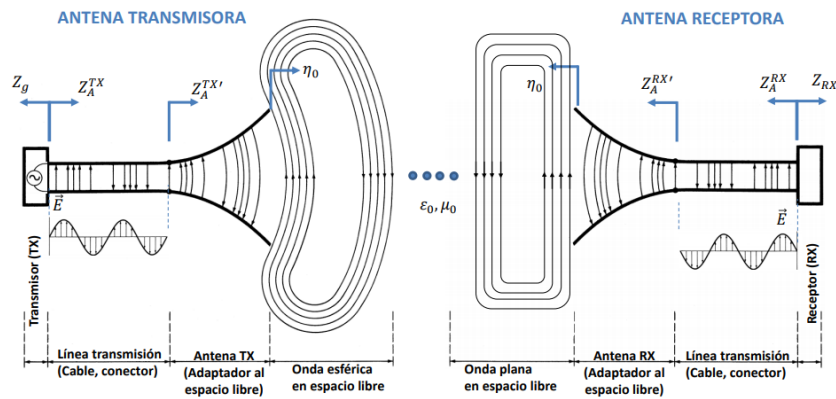


Figura 2.1: Concepto de Antenas. Imagen recuperada de [1]

Hay diferentes tipos de antenas, una de ellas son las antenas omnidireccionales, son de las mas comunes y tienen una gran utilidad en el ámbito de la navegación aérea, en las autopistas aéreas hay diferentes puntos de control por las que los aviones deben de llegar y estar en comunicación ya sea con las torres de control de los aeropuertos o de los centros de comunicaciones aéreos, para abarcar una gran cantidad de esos puntos que podrían estar alrededor de esos centros

o torres se requieren de antenas omnidireccionales, un ejemplo de estas antenas son antenas Dipolo. Otro ejemplo son las directivas, su propagación estará dirigida a cierto ángulo, cuanto mas apuntamiento tendrá esa antena a ese ángulo mayor distancia de propagación tendrá pero su ancho de haz se vera reducido, en el caso contrario a mayor ancho de haz, mayor propagación en diferentes ángulos adyacentes al apuntamiento, pero menor distancia de propagación al ángulo que este apuntando la antena, son antenas útiles a la hora de querer cubrir un punto de control que esta lo bastante lejos, un ejemplo de antenas directivas podría ser una Yagi. [4]

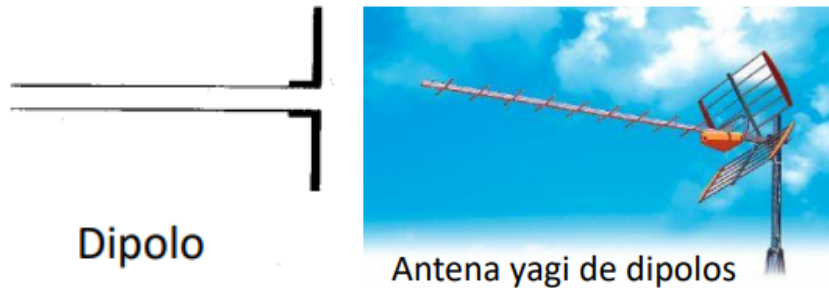


Figura 2.2: Antenas Dipolo y Yagi respectivamente. Imágenes recuperadas de [1]

2.2. Definición de Antena de Parche

Es un componente de impresión circuital y que puede ser de un tipo específico de metal, tiene la capacidad de radiar y recibir ondas electromagnéticas a una determinada anchura y longitud del metal y adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor. [5]

La mayoría de ellas son resonantes, que trabajan en una banda de frecuencias estrecha, para ello tienen que estar adaptadas a esa banda para que no haya problemas. Es decir, si el transmisor esta en funcionamiento a una frecuencia específica y transmite la señal a la antena, si esa antena no estuviera adaptada a esa frecuencia en concreto, entonces pueden producirse problemas de radiación, degradación de la señal y lo que es mas, una eficiencia pobre de la antena.

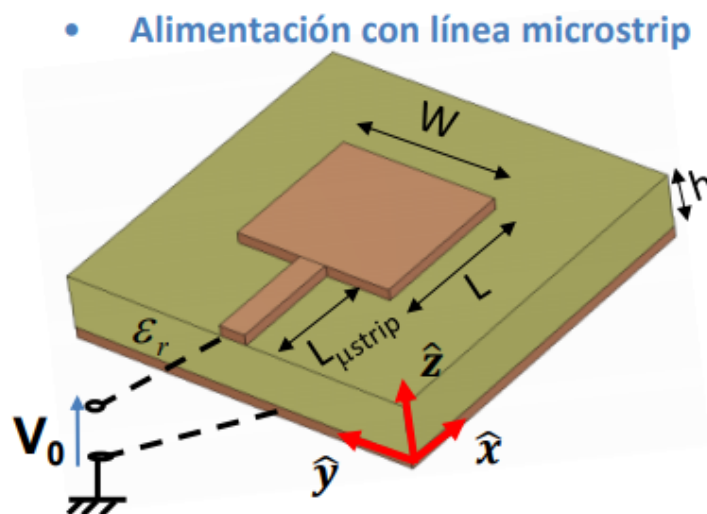


Figura 2.3: Antena de Parche con Alimentación Microstrip. Imagen recuperada de [1]

2.3. Definición de Antena MIMO

Es un conjunto de elementos radiantes que forman una única antena que tiene múltiples entradas y múltiples salidas, por cada elemento radiante tiene su propia señal de propagación, en conjunto, todas las señales de propagación viajan por un único canal a la misma frecuencia, eso conlleva a que la transmisión de información sea altamente efectiva y con poca degradación de transmisión o cuando se recibe la señal de información tenga una recepción altamente fiable. [6]

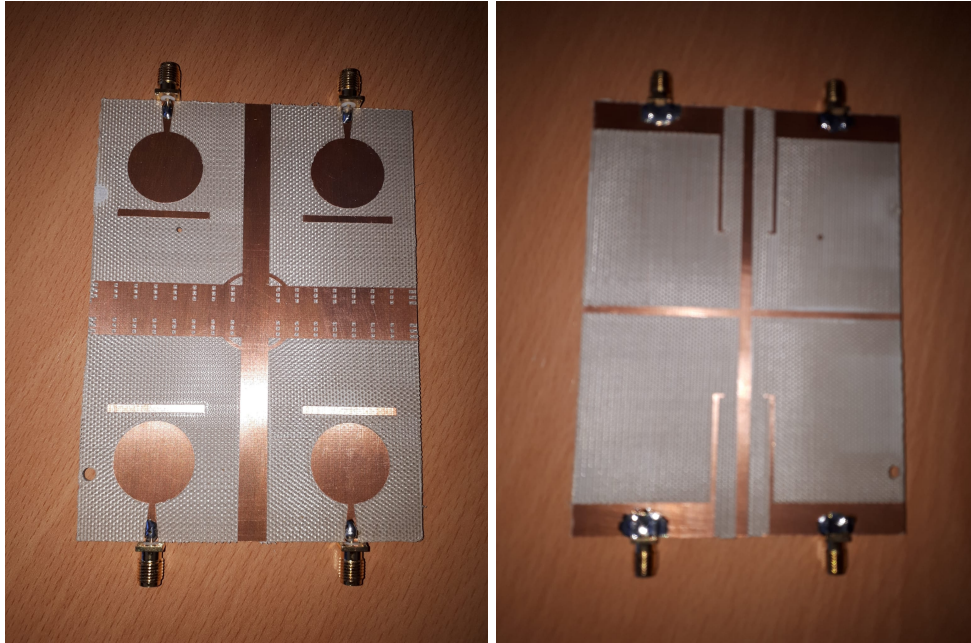


Figura 2.4: Ejemplo de Antena MIMO de cuatro elementos

La tecnología MIMO esta muy utilizada hoy en día en las redes inalámbricas por sus grandes ventajas, su implementación es prácticamente fácil y su precio no es nada caro, tiene una gran diversidad en el espacio ya que se utilizan caminos diferentes de propagación, se transmite velozmente, multiplica su capacidad y no requiere de mucha potencia.

Existen diferentes tipos de técnicas que utilizan estas antenas tanto en transmisión como en recepción, para recepción se utiliza una técnica llamada selección, se basa en escoger el elemento con mejor potencia de recibimiento y con mejor relación señal ruido. Otra técnica que se utiliza se llama conmutación, cuando la señal incide en un elemento, si no supera el umbral de ese elemento radiante cambiara a otro elemento. Una última técnica de recepción se llama combinación, recoge todas las señales recibidas y las clasifica en diferentes tipos, por ejemplo con mayor ganancia, mayor potencia, etc. [7]

Hay varias técnicas que utilizan la diversidad de transmisión, pero hay una en concreto que es la que mas se utiliza, se llama STC o codificación en espacio-tiempo en castellano, se basa en el envío de la misma información en diferentes copias codificadas de una trama de datos, esto aumenta la fiabilidad ya que se esperaría con que una de estas copias las recibiría una antena receptora para posteriormente decodificarla de manera fiable. [8]

2.4. Adaptación de Impedancias

El concepto de adaptación de impedancias es asegurar que la señal sea lo mas eficiente posible, desde el conector hasta el elemento radiante. [9]

Por lo general, tanto los transmisores como los receptores están diseñados para una impedancia de 50 Ohmios. Sin embargo, las impedancias de las antenas eficientes suelen ser diferentes de 50 Ohmios. Por ello se debe de poner un transformador de impedancias que sería la línea de transmisión que transforme, la impedancia de 50 Ohmios a la impedancia del parche, así se aseguraría una transmisión de señal eficiente. Al ser nuestras antenas circuitales impresas, se explicara este concepto con una línea de transmisión como ejemplo:

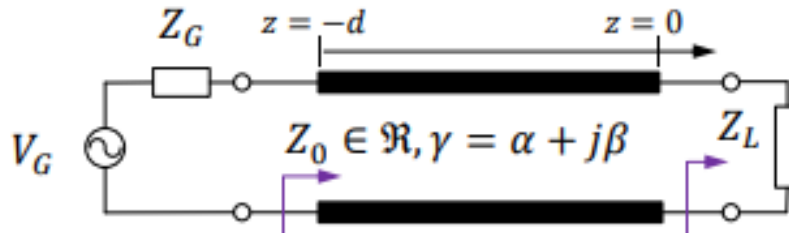


Figura 2.5: Ejemplo de Línea de Transmisión. Imagen recuperada de [2]

La impedancia esta formada por una parte real y una parte imaginaria, se debe de tener en cuenta un criterio importante a la hora de diseñar la antena y es, al ser posible, eliminar o anular la parte imaginaria de esa impedancia. Cumpliendo con ese criterio tendríamos una antena resonante. [9]

Esta impedancia esta en la entrada de la antena y se define como la relación entre el voltaje y la intensidad entre los puntos extremos o bornes de la entrada de la antena. [9] El transformador generalmente puede ser de " $\lambda/4$ ", transforma la impedancia del conector a la impedancia del elemento radiante y esto se consigue aplicando la raíz de la impedancia del conector por la impedancia del elemento radiante. Pero este no es el tipo de transformador que se utiliza en nuestras antenas, el tipo de transformador que se utiliza es un "taper", lo que hace es transformar una impedancia de 50 Ohmios a una impedancia genérica, lo que provoca un ancho de banda bueno pero no óptimo, porque no estamos adaptando a una impedancia específica pero es lo ideal para un ancho de banda lo bastante grande como para poder cumplir con los requisitos establecidos para nuestros diseños.

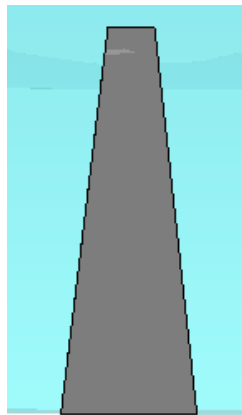


Figura 2.6: Transformador Taper

2.5. Ancho de Banda

Como se mencionó antes, por lo general la mayoría de las antenas tienen un ancho de banda estrecho, la definición del ancho de banda es el rango de frecuencias donde puede transmitir o recibir señal de información de manera eficiente. [9]

Se puede definir también como la frecuencia máxima menos la frecuencia mínima. [3]

$$BandWidth = f_{max} - f_{min} \quad (2.1)$$

Para el ancho de banda relativo, se define como la frecuencia máxima menos las frecuencia mínima dividido todo por la frecuencia central a la que se diseña la antena.

$$Relative_BandWidth = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} * 100 \quad (2.2)$$

Para una antena de parche, el formulario del ancho de banda es diferente, se produce un incremento en la adaptación a medida que aumenta el espesor del dieléctrico y reduciendo la permitividad eléctrica. [1]

$$BandWidth_{parche} = 3,77 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} * \frac{W}{L} * \frac{h}{\lambda_0} \quad (2.3)$$

Es uno de los parámetros fundamentales a la hora de diseñar cualquier tipo de antena, cuando se habla de la definición, se hace referencia a la adaptación en un intervalo de frecuencias por debajo de -10 dB para reflexión y por debajo de -20 dB para desacoplo entre elementos.

2.6. Ganancias y Directividad

La unidad con la que se expresa es el Decibelio, es una unidad que se expresa como la relación de ganancia o pérdidas de un sistema de comunicaciones.

Por tanto, la ganancia de la antena se describe como la relación en todos los puntos del espacio, entre la densidad de radiación de la antena y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica. [9]

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2.4)$$

Es decir, si cogiésemos un punto del diagrama de radiación de la antena, en ese mismo punto tiene una ganancia determinada. Por otro lado tenemos la directividad que es la relación entre la intensidad de radiación en cada dirección del espacio y la de una antena isotrópica que radie la misma potencia total. La diferencia fundamental entre la ganancia y la directividad es la potencia disipada, por ello si no hubiese pérdidas por conductividad o por dieléctrico o las dos, es decir pérdidas óhmicas, la directividad sería igual a la ganancia. [9]

$$G(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) * \zeta_{rad} \quad (2.5)$$

La ganancia realizada de una antena es la ganancia reducida por la potencia perdida por la desadaptación, por la conductividad y por el dieléctrico. De nuevo si se hablase sobre una antena que tuviese una eficiencia total del cien por cien, la ganancia realizada sería igual a la directividad. [3]

$$G_{realizada}(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) * \zeta_{tot} \quad (2.6)$$

2.7. Parámetros S de una Antena

Se definen como la relación de las ondas reflejadas con respecto a las ondas incidentes ya sea en el mismo puerto o en diferentes puertos. Eso nos llevaría a saber cuanta potencia le esta llegando a cada puerto con la ayuda de esas ondas. [2]

Con la ayuda de la siguiente imagen, se va a poder sacar las definiciones de los diferentes parámetros S que puede a ver en una antena. Para ello se utilizara un cuadripolo como ejemplo.



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Figura 2.7: Cuadripolo Parámetros S. Imagen recuperada de [2]

Para poder sacar los parámetros S es necesario que se implemente la condición de $a_1 = 0$ y $a_2 = 0$, para conseguir eso es necesario que la impedancia de la carga que se meta en cada puerto tenga que ser la misma impedancia del mismo puerto (Z_{0i} que sería la relación de la tensión y la corriente en ese puerto). Así se aseguraría de que no haya ondas incidentes en los puertos que tengan carga y se podrá hacer así las medidas con exactitud. [2]

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}|_{a_2=0} \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1}|_{a_2=0} \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2}|_{a_1=0} \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2}|_{a_1=0} \quad (2.7)$$

Definiendo las variables a y b, a_i es la onda incidente del puerto i y b_i la onda reflejada del puerto i , por otro lado los parámetros definidos como S_{ii} son los parámetros de reflexión y los S_{ji} siendo $j \neq i$ los de transmisión, por tanto el significado físico que tienen estos parámetros son: [2]

$$|S_{ii}|^2 = \frac{P_{\text{reflejada por el circuito en la puerta } i}}{P_{\text{disponible del generador en la puerta } i}} \quad |S_{ji}|^2 = \frac{P_{\text{entregada a la carga en la puerta } j}}{P_{\text{disponible del generador en la puerta } i}} \quad (2.8)$$

La siguiente tabla muestra la definición de cada uno de los 4 parámetros S:

| PARÁMETRO | DEFINICIÓN |
|-----------|---|
| S_{11} | La potencia reflejada en el puerto 1 entre la potencia disponible del generador en el puerto 1 |
| S_{21} | La potencia entregada a la carga del puerto 2 entre la potencia disponible del generador en el puerto 1 |
| S_{12} | La potencia entregada a la carga del puerto 1 entre la potencia disponible del generador en el puerto 2 |
| S_{22} | La potencia reflejada en el puerto 2 entre la potencia disponible del generador en el puerto 2 |

Tabla 2.1: Definición de los Parámetros S de este cuadripolo

2.8. Diagramas de Radiación de una Antena

Es la representación de una emisión de energía en forma de onda electromagnética, su representación gráfica habitualmente estará determinada por las coordenadas esféricas. La radiación de una antena se puede determinar a partir del campo lejano de la misma. [9]

Se puede representar con el sistema de coordenadas esféricas: [1]

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(r, \theta, \phi) = \vec{E}_r(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\theta(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.9)$$

Es esencial determinar los campos eléctrico y magnético para poder dibujarlo, con solo el campo eléctrico sería mas que suficiente ya que, el campo magnético estaría perpendicular al campo eléctrico.

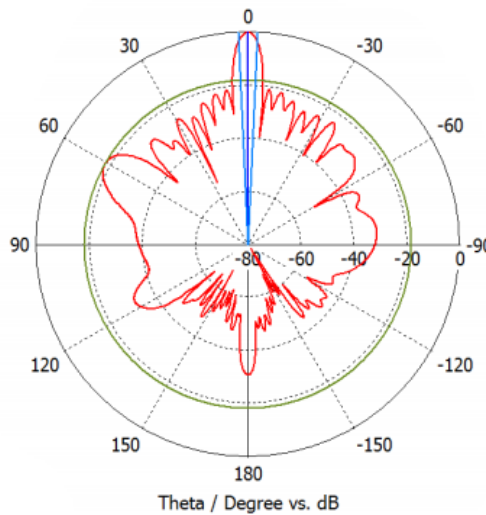


Figura 2.8: Ejemplo de representación polar. Imagen recuperada de [1]

Hay diferentes tipos de radiación, por ejemplo la radiación isotrópica que significa que radia por igual en todas las direcciones. Para tener este tipo de radiación se requiere de una antena isotrópica, lo cual es físicamente imposible y por lo tanto a día de hoy, no se puede obtener este tipo de radiación. [9]

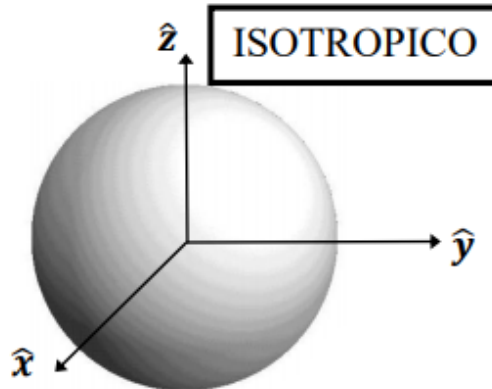


Figura 2.9: Radiación Isotrópica. Imagen recuperada de [1]

Si fuese una antena directiva con la que tratar, su radiación sería directiva y se vería una porción del lóbulo principal del diagrama, seguido de lóbulos secundarios. Con el lóbulo principal, se determinaría en que dirección angular se propagaría la radiación electromagnética. [9]

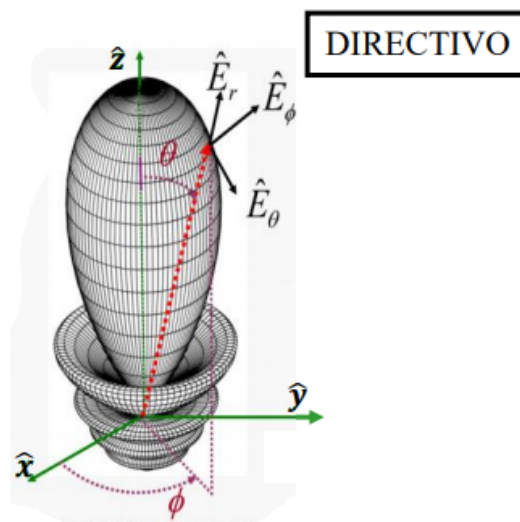


Figura 2.10: Radiación Directiva. Imagen recuperada de [1]

Otro tipo de radiación sería la omnidireccional, que se propaga por igual en todos los planos ortogonales, este tipo de antenas se utiliza mucho en comunicaciones tierra-aire en sistemas de comunicaciones aéreas, que cubre una zona determinada por donde vuelan los aviones, ofreciendo sus servicios. [9]

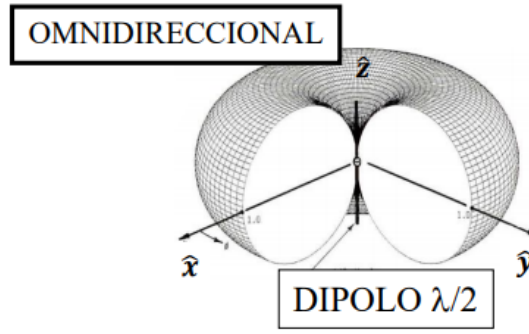


Figura 2.11: Radiación Omnidireccional. Imagen recuperada de [1]

2.9. Eficiencias de una Antena

Existen diferentes tipos de eficiencias a la hora de hablar de la eficiencia que tiene una antena, se define como la evaluación de las perdidas que puede a ver en diferentes puntos de la antena. Por tanto se va a definir los diferentes tipos de eficiencia: [9]

Eficiencia de adaptación: Se encarga de evaluar las perdidas que hay por desadaptación a la antena. [1]

$$\zeta_{adap} = \frac{P_{ent}}{P_{dg}} = 1 - |\Gamma_A|^2 \quad (2.10)$$

Eficiencia de conductores ($\zeta_{dis,c}$): Se encarga de evaluar las perdidas que hay en los conductores que forman la antena. [1] [9]

Eficiencia de dieléctricos ($\zeta_{dis,d}$): Se encarga de evaluar las perdidas que hay en el dieléctrico que forma la antena. [1] [9]

Eficiencia de radiación: Se encarga de evaluar las perdidas que hay por los dieléctricos y de los conductores que forman la antena. [1] [9]

$$\zeta_{rad} = \zeta_{dis,c} * \zeta_{dis,d} \quad (2.11)$$

Eficiencia total: Se encarga de evaluar todas las perdidas que se producen en la antena. [1] [9]

$$\zeta_{tot} = \zeta_{dis,c} * \zeta_{dis,d} * \zeta_{adap} = \zeta_{adap} * \zeta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{dg}} \quad (2.12)$$

2.10. Tecnología UWB

Esta tecnología se define cuando el ancho de banda sea enormemente relativo (el 20 por ciento o mas), velocidades que pueden superar los 100 Mbps. [10]

La señal que produce son pulsos cortos con rango muy preciso que se requiere de una energía ínfima y no se requiere de ello sistemas adicionales ya que se puede transmitir sin portadora. El espectro de la señal puede ocupar anchos de banda de otros servicios pero con unas interferencias bastante bajas y eso es debido a que esta tecnología, distribuye señales de potencia muy baja a lo largo de anchos de banda muy anchos, lo que conlleva a que la densidad de frecuencia sea muy

bajo a niveles micro-vatios en cuanto a nivel de interferencias, como se requiere de una energía muy baja entonces la prolongación de la batería es mas duradera, por ello esta tecnología se sigue desarrollando en la red de área personal inalámbrica (WPAN). [11] [10]

También se usa en las conexiones de Bus Serie Universal inalámbrico (WUSB) de gran velocidad como por ejemplo escáners, impresoras, periféricos de ordenador, bluetooth, móviles 3G o en dispositivos de almacenamiento externo.

Por lo general, UWB requiere de distancias cortas y al gran ancho de banda asequible, se puede considerar para aplicaciones como por ejemplo cámaras de vídeo digitales y transferencia de archivos de dispositivo a dispositivo como los reproductores de música portátiles y teléfonos celulares.

El ancho de banda se puede usar para aplicaciones de streaming de vídeo, una ventaja fundamental que tiene esta tecnología es la capacidad de espacio en el espectro que para ello, sera fácil compartir con otros dispositivos debido a sus frecuencias.

Otra ventaja magnífica que tiene esta tecnología es la facilidad de penetración en paredes mucho mejor que otras tecnologías inalámbricas tradicionales, por ello es muy útil la transmisión de datos de dispositivos entre varios edificios.

3

Criterios y Diseño de Antenas

3.1. Criterios de Sistema

A continuación se va a hablar de los criterios de diseño que han sido tomados desde el inicio del desarrollo e implementación de las antenas. Para ello se deberá de tener en cuenta la banda de trabajo o de operación, la adaptación, el acoplamiento (solo para las MIMO's) y por ultimo las limitaciones de dimensiones de las tres antenas.

3.1.1. Banda de Trabajo

Se han desarrollado e implementado 3 tipos de antenas, Antena de un elemento, antena MIMO de dos elementos y antena MIMO de cuatro elementos. En todas ellas la banda de diseño según los criterios que se han establecido, que la frecuencia mínima de trabajo ha de ser de 3.1 GHz y la frecuencia máxima de trabajo a 10.6 GHz, no obstante se intentara reducir a ser posible la frecuencia mínima y aumentar la frecuencia máxima para tener mayor rango de banda de trabajo.

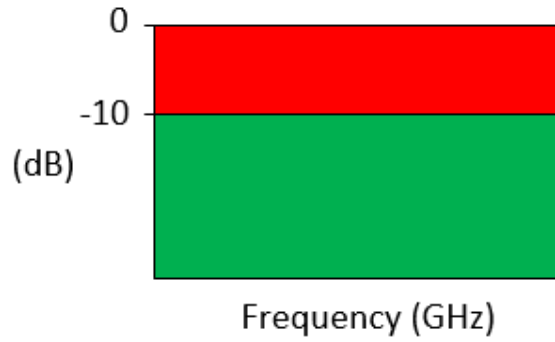
3.1.2. Adaptación

Se ha mencionado antes que típicamente, las antenas tienen una frecuencia resonante a la que están adaptadas. Esta adaptación ocurre cuando la reflexión este por debajo o igual que -10 dB.

En el caso de las tres antenas que hemos diseñado, en nuestro requisito establecido y al ser un diseño con tecnología UWB, deseamos que en la banda de operación de adaptación, los parámetros S_{ii} estén por debajo de -10 dB en toda la banda comprendida desde 3.1 GHz hasta 20 GHz.

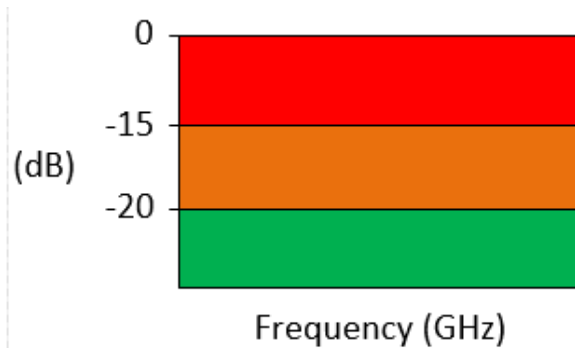
3.1.3. Acoplamiento

En este caso, lo que deseamos conseguir es que en la banda de operación de acoplamiento, los parámetros S_{ji} estén por debajo de -20 dB en toda la banda comprendida entre 3.1 GHz

Figura 3.1: Adaptación S_{ii}

hasta 20 GHz.

Se puede decir que sería aceptable para una banda de calidad media, un acoplamiento que este entre -15 dB y -20 dB, pero en nuestros requisito, que nunca este por encima de -20 dB.

Figura 3.2: Acoplamiento S_{ji}

3.1.4. Dimensiones

Las limitaciones de las dimensiones que se ha escogido para las antenas MIMO son las siguientes:

Antena MIMO de dos elementos: 90x90 (mm)

Antena MIMO de cuatro elementos: 90x180 (mm)

Solo las antenas MIMO se les debe de imponer las limitaciones, ya que estas van a ir dirigidas a dispositivos con red inalámbrica. La antena de un elemento no tiene limitaciones, no obstante no superare las limitaciones establecidas para las antenas MIMO, esta antena la utilizamos a fin de poder desarrollar las antenas MIMO.

3.2. Diseño

En esta sección, se va a describir el diseño que se ha llevado a cabo para el desarrollo, implementación y cumplimiento de los requisitos de las tres antenas.

Lo primero que se describirá en este apéndice serán los materiales utilizados para el diseño de las antenas, en primer lugar las antenas fueron fabricadas por una placa de material FR-35

del dieléctrico con un espesor de 1.524 mm que tiene una permitividad eléctrica ϵ_r de 3.5 y la permeabilidad magnética μ_r de 1, cubierta por ambas caras de cobre, un metal conductivo con un espesor de 0.03 mm en las dos caras de las antenas.

| PARÁMETROS | VALOR |
|-------------------------|------------|
| ϵ_r | 3.5 |
| μ_r | 1 |
| Espesor del Dieléctrico | 1.524 (mm) |
| Espesor del Cobre | 0.03 (mm) |

Tabla 3.1: Parámetros del Sustrato.

Para cada antena se va describir sus características, adaptación y acoplamiento (el acoplamiento para el caso de dos y cuatro elementos), los diagramas de radiación en valor absoluto a cuatro, siete, diez, quince y diecinueve GHz en plano 3D para la directividad, ganancia y ganancia realizada en campo lejano.

3.2.1. Antena de un elemento

El diseño de esta antena es la inicial y la que conlleva con el desarrollo de las siguientes antenas de mas de un elemento, para ello se ha empezado estableciendo los criterios de sistema para que la frecuencia mínima de trabajo sea de 3.1 GHz o menos.

En primer lugar para conseguir cumplir con los requisitos, se debe de tener en cuenta que cuanto mas alta sea la longitud del taper mejor sera la adaptación de la antena, esto iría acompañado con el radio del elemento radiante que es la que determinara a cuanto sera la frecuencia mínima de trabajo, a mayor radio menor sera la frecuencia mínima de trabajo.

Por tanto a mayor longitud del taper, mas un radio mayor del elemento radiante, nos daría una banda de trabajo que empezaría desde una determinada frecuencia mínima de trabajo hasta 20 GHz, por supuesto que este por debajo de -10 dB para que la antena este adaptada y así se consigue cumplir con los requisitos establecidos.

Diseñando el elemento radiante, se toma la siguiente expresión:

$$Circle_Center = L_Taper + R - 1$$

Se centra el elemento radiante de manera que si se va variando el radio del elemento o la longitud del taper, que no se desvíe de su sitio, se puede observar que en la misma formula hay un menos uno, eso servirá para que el elemento radiante no este justo en la franja o el borde del Taper_Up y poder meterse un milímetro para que no haya problemas en la transmisión de la señal.

Además la grieta o gap que hay entre el plano de masa y el punto mas bajo del elemento radiante, ayudara con la adaptación de la antena, es decir a un determinado valor entre 0.6 o 1 mm de espacio entre ellos mejorara el S11 de la antena.

El plano de masa que esta por debajo del taper, ayudara para que la transmisión de la señal que sale del conector hasta el elemento radiante sea lo mas eficaz posible. Se ha dicho que el plano de masa esta por debajo de la linea de transmisión, es decir en la otra cara de la antena pero no cubre todo el taper, solo hasta el punto desde que comienza el gap por la razón antes mencionada en el párrafo anterior.

No se debe de olvidar de que hay que respetar las dimensiones del espacio para asegurarse de que las antenas MIMO que se diseñaran puedan encajar en los dispositivos. Por tanto en un

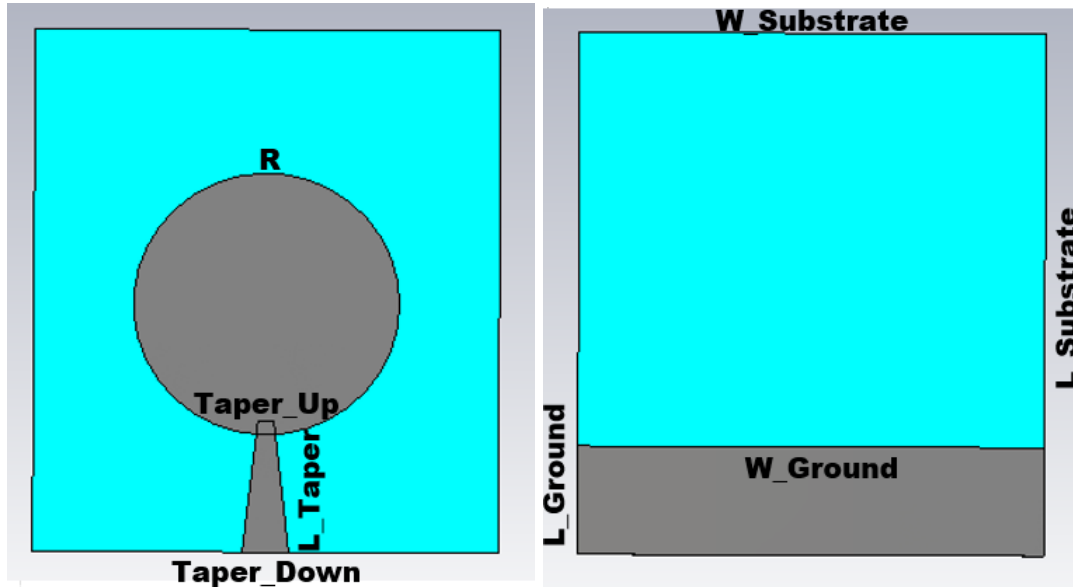


Figura 3.3: Primera aproximación de Antena de un elemento.

| PARAMETERS | VALUE (mm) |
|-------------|------------|
| Taper_Up | 1.2 |
| Taper_Down | 3.5 |
| L_Ground | 8.3 |
| W_Ground | 35 |
| L_Substrate | 40 |
| W_Substrate | 35 |
| L_Taper | 10 |
| R | 10 |

Tabla 3.2: Parámetros de Antena de un elemento primera aproximación.

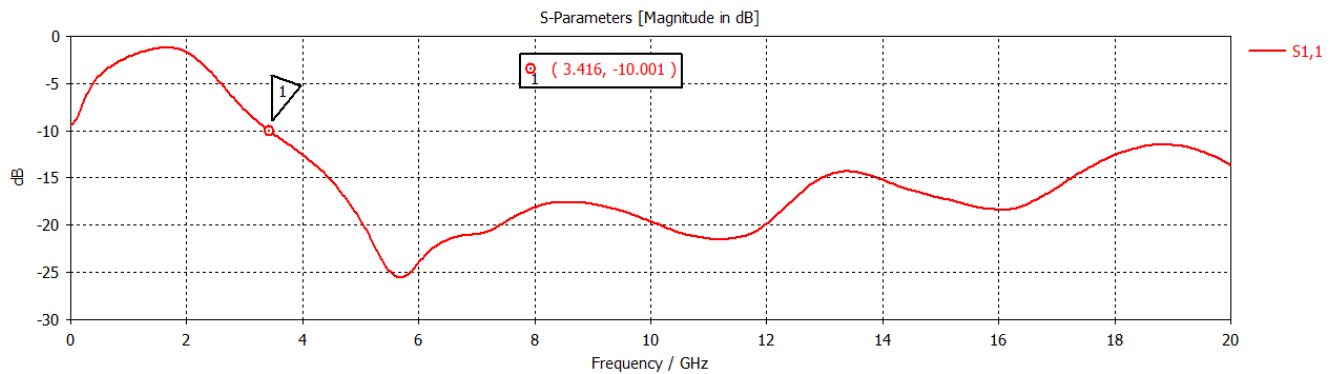


Figura 3.4: S11 - Primera aproximación de Antena de un elemento.

primera aproximación se ha decidido establecer que la longitud del taper sea igual al radio del elemento radiante.

Sin embargo se puede observar que la frecuencia mínima de trabajo esta por encima del requisito establecido, por lo que se decide aumentar el radio del elemento radiante.

Por tanto haciendo esto, se obtiene la siguiente antena de un elemento con sus características definidas en una tabla:

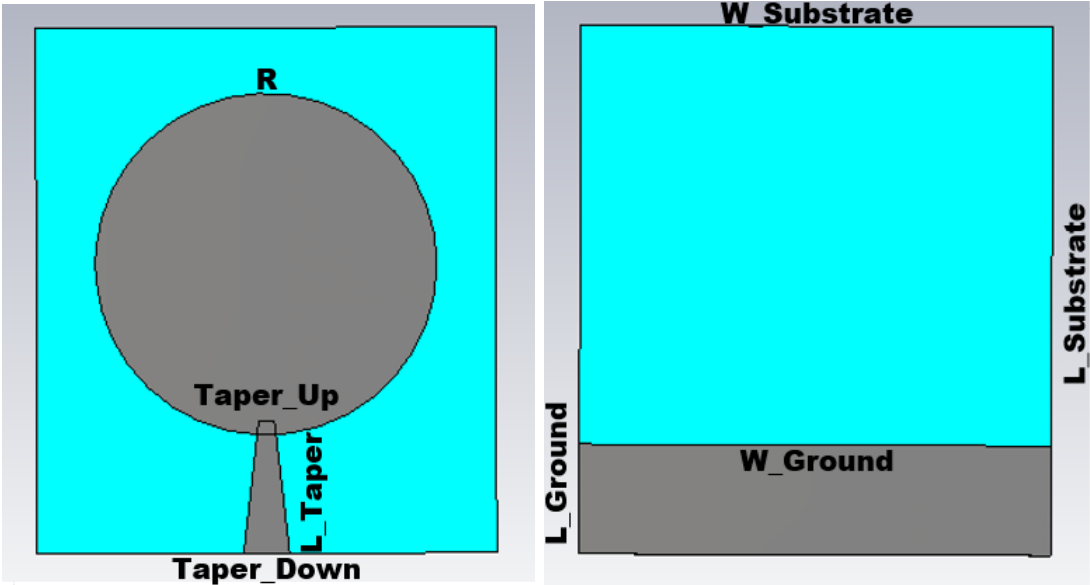


Figura 3.5: Antena de un elemento

| PARAMETERS | VALUE (mm) |
|-------------|------------|
| Taper_Up | 1.2 |
| Taper_Down | 3.5 |
| L_Ground | 8.3 |
| W_Ground | 35 |
| L_Substrate | 40 |
| W_Substrate | 35 |
| L_Taper | 10 |
| R | 13 |

Tabla 3.3: Parámetros de Antena de un elemento.

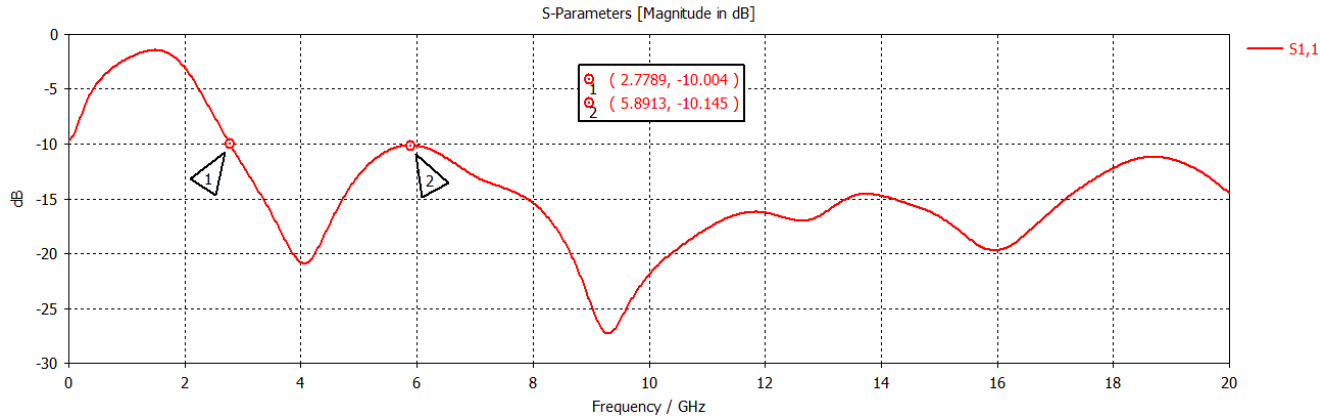


Figura 3.6: S11 - Antena de un elemento.

Para la antena de un elemento, además de cumplir la banda de diseño tiene la mejora de

adaptación desde 2.78 GHz hasta 20 GHz.

Por ello la dimensión de la antena quedara reflejada en la siguiente tabla:

| DIMENSIÓN | VALOR (mm) |
|-------------|------------|
| Altura | 40 |
| Anchura | 35 |
| Profundidad | 1.584 |

Tabla 3.4: Dimensiones de Antena de un elemento.

Ahora que se tiene realizado el diseño de la antena, se pasara a obtener los diagramas de radiación, tal y como se menciona en el apéndice 3.2, el hecho de que se haya escogido las frecuencias descritas en ese apéndice, es para analizar los indicadores de la calidad de la antena, es decir las diferentes directividades, ganancias, ganancias realizadas, eficiencias de radiación y eficiencias totales desde la frecuencia mínima hasta la frecuencia máxima.

Se debe de tener en cuenta que la directividad es la ganancia máxima sin tener en cuenta las pérdidas que sufre la antena, la ganancia de la antena es lo mismo pero teniendo en cuenta la eficiencia de radiación, es decir las pérdidas del material dieléctrico mas las pérdidas de la conductividad. En este caso no se debe de tener en cuenta las pérdidas del conductor ya que para el caso teórico, el metal que se utiliza en el CST es (PEC) es decir un conductor eléctrico perfecto, por definición al ser perfecto no debe de tener pérdidas a cualquier frecuencia.

Por último se tiene la ganancia realizada, para esta ganancia se tiene en cuenta la eficiencia total de la antena, es decir todas las pérdidas que sufre la señal en la antena.

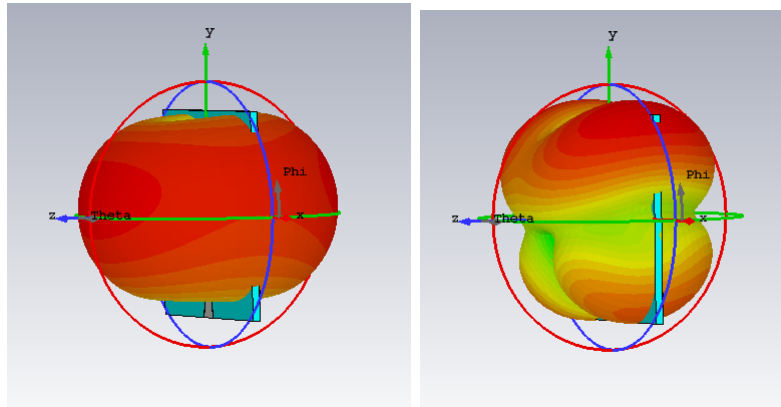


Figura 3.7: Diagramas de radiación para un elemento a 4 y 7 GHz respectivamente

| 4 GHz | | 7 GHz | |
|---|------------|---|-------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1745 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.05883 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.2109 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.2846 dB |
| Directividad | 3.17 dBi | Directividad | 6.175 dBi |
| Ganancia | 2.995 dBi | Ganancia | 6.116 dBi |
| Ganancia Realizada | 2.959 dBi | Ganancia Realizada | 5.891 dBi |

Tabla 3.5: Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para un elemento.

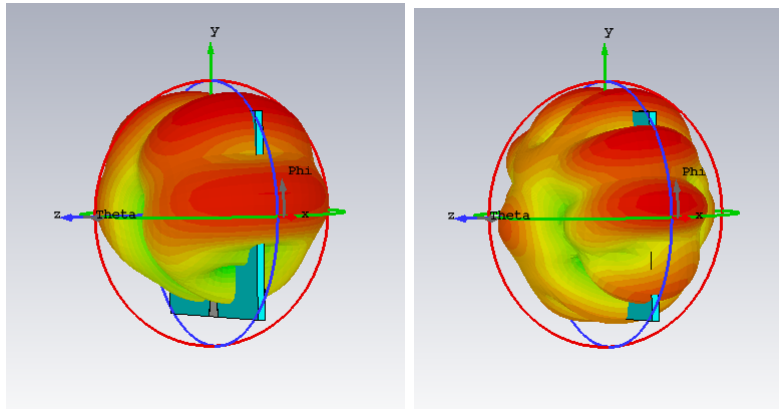


Figura 3.8: Diagramas de radiación para un elemento a 10 y 15 GHz respectivamente

| 10 GHz | | 15 GHz | |
|---|------------|---|------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1164 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.3471 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.1447 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.4425 dB |
| Directividad | 5.871 dBi | Directividad | 6.106 dBi |
| Ganancia | 5.754 dBi | Ganancia | 5.759 dBi |
| Ganancia Realizada | 5.726 dBi | Ganancia Realizada | 5.663 dBi |

Tabla 3.6: Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para un elemento.

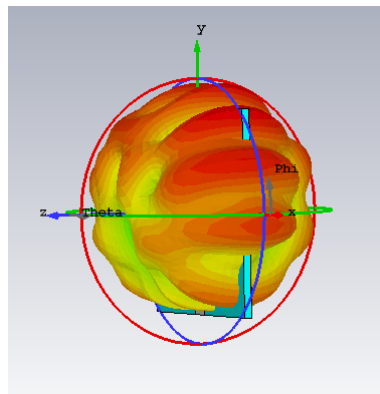


Figura 3.9: Diagrama de radiación para un elemento a 19 GHz

| 19 GHz | |
|---|------------|
| Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1826 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.5096 dB |
| Directividad | 6.167 dBi |
| Ganancia | 5.985 dBi |
| Ganancia Realizada | 5.658 dBi |

Tabla 3.7: Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para un elemento.

El cambio que sufren tanto las eficiencias como las ganancias es debido a la relación de la dimensión de la antena con respecto a la longitud de onda, a medida que aumenta la frecuencia

va variando la longitud de onda y eso afecta a los parámetros de radiación, a medida que aumenta la frecuencia, la ganancia aumenta, pero llega un punto de la frecuencia que vuelve a bajar.

Se decidió realizar una simulación de hasta 50 GHz y este es el resultado:

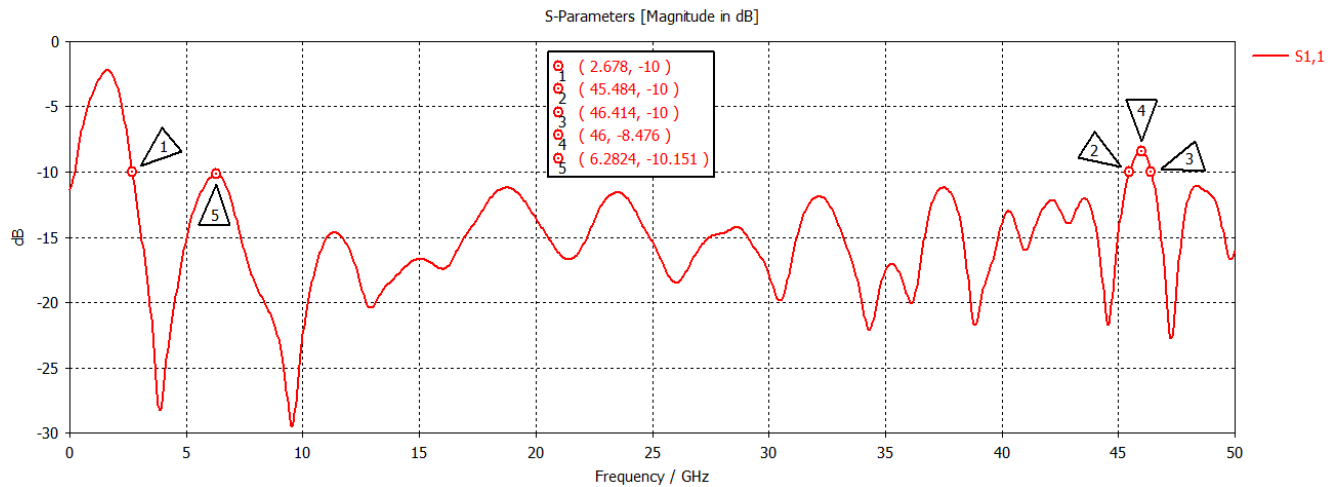


Figura 3.10: S11 - Antena de un elemento hasta 50 GHz.

La frecuencia mínima es de 2.678 GHz, mas pequeña que la simulación de hasta 20 GHz y se observa que la banda de trabajo es bastante amplia. Sin embargo el rango que va desde 45.48 GHz hasta 46.41 GHz es el único que no esta adaptado y que no cumple con el requisito de adaptación. No obstante, se tiene una muy buena banda en este caso.

3.2.2. Antena MIMO de dos elementos

En el desarrollo de esta antena se empezó tomando la antena de un elemento que no cumplía con los requisitos establecidos, ya que para lo que se requiere es que las antenas sean lo mas pequeñas posibles en cuanto a material dieléctrico como metal de cobre posible.

Con la ayuda del CST, lo que se hizo fue un espejo de la antena de un elemento, creando así el segundo elemento de la antena MIMO de 2 elementos. Una vez hecho eso, se puso una barrera vertical de 40 mm de altura entre los dos elementos en la cara frontal de la antena, se quería conseguir un aislamiento que cumpliera con el requisito del acoplamiento entre los dos elementos pero no cumplía.

El siguiente paso fue añadir dos barreras también verticales en la cara trasera de la antena, seguía sin cumplirse. Acto seguido se pusieron unas barreras horizontales muy pequeñas también en la cara anterior, en lo alto de las dos barreras verticales y otras dos en la parte mas de a bajo justo pegados con sus respectivos planos de masa, seguía sin cumplirse el aislamiento requerido.

Como paso final en la cara frontal, se propuso añadir mas dieléctrico entre los dos elementos y también en los extremos de la antena y antes de simular la antena, se añado también mas anchura en la barrera vertical para incrementar mas el aislamiento para así bajar el acoplamiento entre los dos elementos, como resultado del parámetro S21 cumplió con el requisito del acoplamiento y también cumplió con la adaptación requerida.

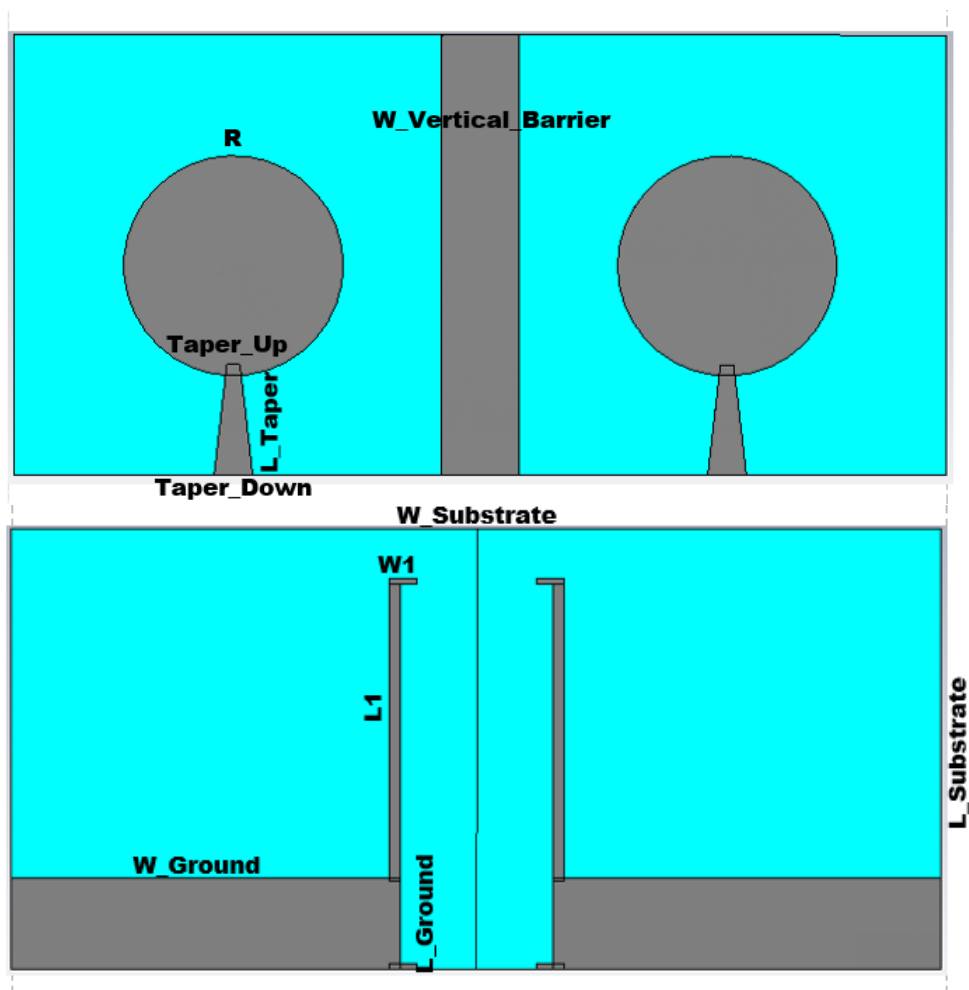


Figura 3.11: Antena MIMO de dos elementos

| PARAMETERS | VALUE (mm) |
|--------------------|------------|
| Taper_Up | 1.2 |
| Taper_Down | 3.5 |
| L_Ground | 8.3 |
| W_Ground | 35 |
| L_Substrate | 40 |
| W_Substrate | 85 |
| L_Taper | 10 |
| R | 10 |
| W_Vertical_Barrier | 7 |
| L1 | 27 |
| W1 | 2.5 |

Tabla 3.8: Parámetros de la Antena MIMO de dos elementos.

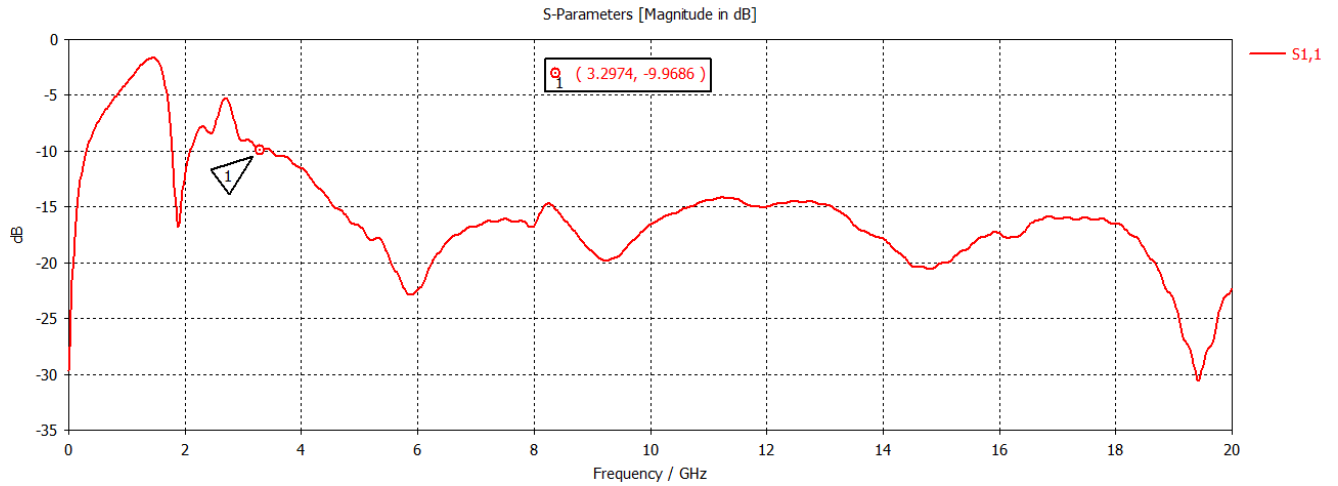


Figura 3.12: S11 - Antena MIMO de dos elementos.

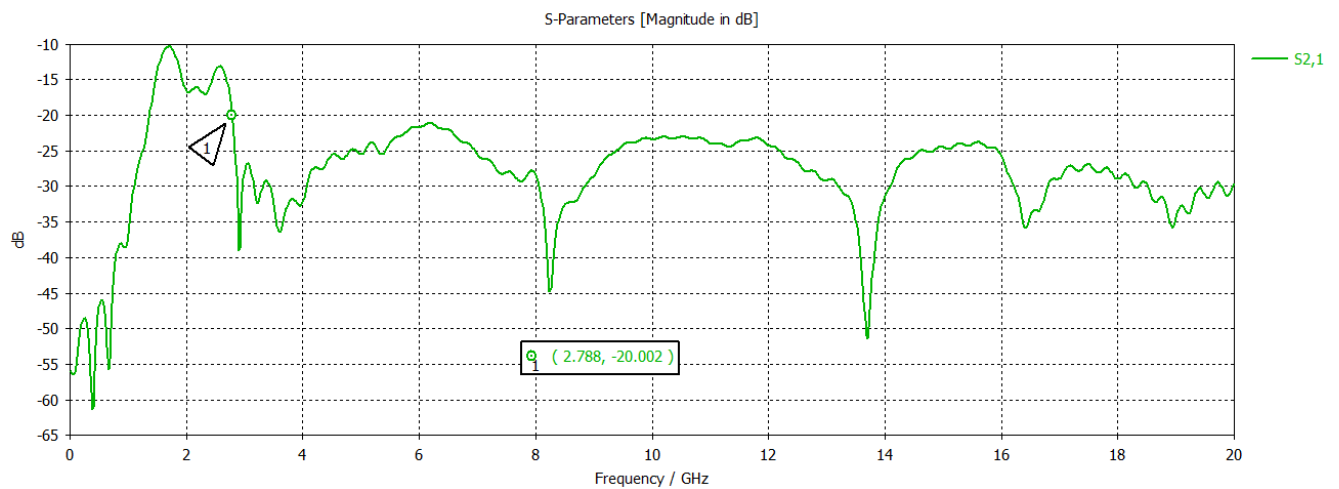


Figura 3.13: S21 - Antena MIMO de dos elementos.

Se ha escogido como análisis principal el puerto 1, ya que el análisis sería el mismo para el puerto 2, es decir los parámetros S_{22} y el S_{12} son iguales al S_{11} y el S_{21} respectivamente, debido a la simetría que tiene la antena.

La antena MIMO de 2 elementos, su banda de adaptación empieza desde 3.3 GHz hasta 20 GHz, no cumple al cien por cien con lo establecido, sin embargo no tiene importancia de que sea una diferencia de 0.2 GHz. El acoplamiento que presenta lo cumple, empezando desde 2.78 GHz hasta 20 GHz según la simulación representada para el parámetro S21.

Se representara a continuación la dimensión de la antena MIMO de dos elementos:

| DIMENSIÓN | VALOR (mm) |
|-------------|------------|
| Altura | 40 |
| Anchura | 85 |
| Profundidad | 1.584 |

Tabla 3.9: Dimensiones de Antena MIMO de dos elementos.

Se explicaran los diagramas de radiación obtenidos para esta antena, se debe de tener en cuenta que se ha analizado un único puerto que es el 1, ya que en el puerto 2 tendrá la misma explicación pero al revés, de nuevo eso es debido a la simetría de la antena.

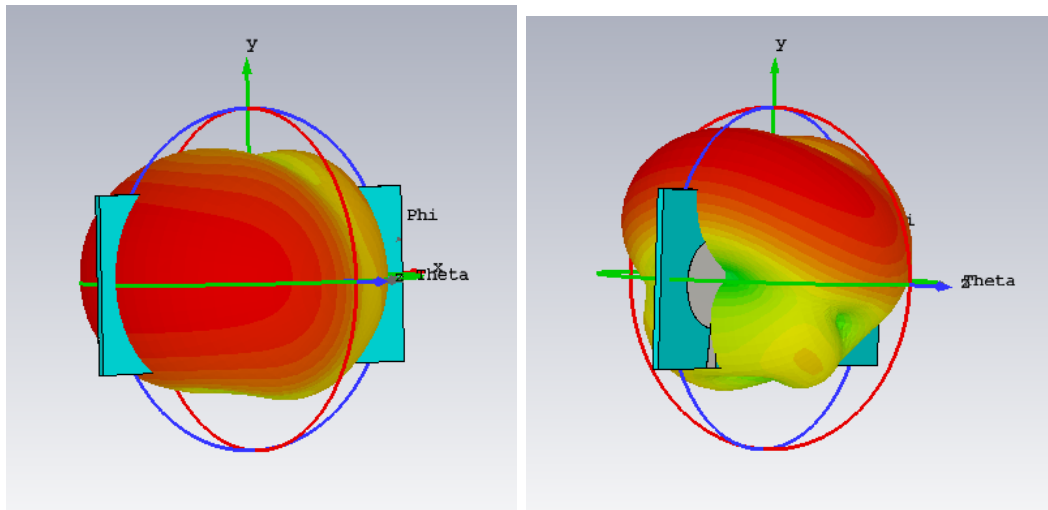


Figura 3.14: Diagramas de radiación para dos elementos a 4 y 7 GHz respectivamente

| 4 GHz | | 7 GHz | |
|---|------------|---|------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.2947 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1635 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.6103 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.2681 dB |
| Directividad | 4.795 dBi | Directividad | 6.706 dBi |
| Ganancia | 4.501 dBi | Ganancia | 6.542 dBi |
| Ganancia Realizada | 4.185 dBi | Ganancia Realizada | 6.438 dBi |

Tabla 3.10: Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para dos elementos.

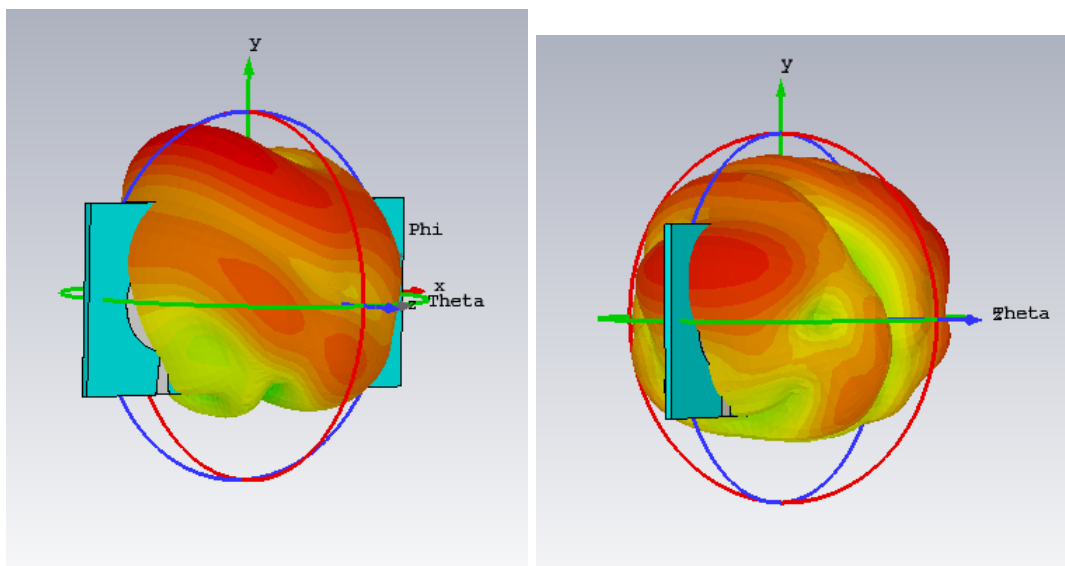


Figura 3.15: Diagramas de radiación para dos elementos a 10 y 15 GHz respectivamente

| 10 GHz | | 15 GHz | |
|---|-------------|---|------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.03566 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1203 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.1530 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.1791 dB |
| Directividad | 7.020 dBi | Directividad | 6.747 dBi |
| Ganancia | 6.985 dBi | Ganancia | 6.626 dBi |
| Ganancia Realizada | 6.867 dBi | Ganancia Realizada | 6.567 dBi |

Tabla 3.11: Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para dos elementos.

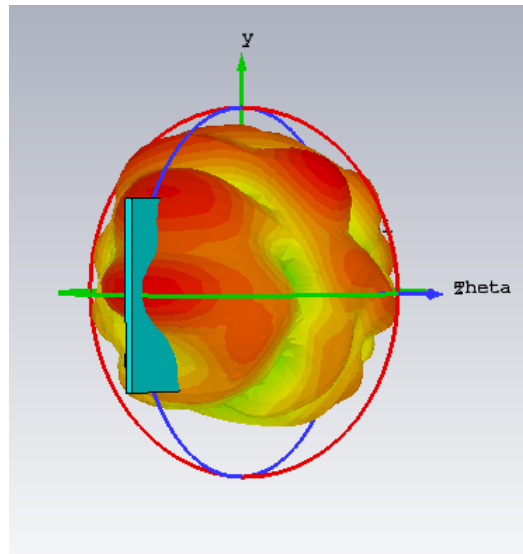


Figura 3.16: Diagrama de radiación para dos elementos a 19 GHz

| 19 GHz | |
|---|------------|
| Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.2423 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.2641 dB |
| Directividad | 6.850 dBi |
| Ganancia | 6.608 dBi |
| Ganancia Realizada | 6.586 dBi |

Tabla 3.12: Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para dos elementos.

El comportamiento que tienen estos diagramas son muy similares a las de un elemento pero con una diferencia fundamental, las ganancias son mas elevadas y eso es debido a que cuando la radiación se propaga en dirección al otro elemento radiante, esa se escapa de esa dirección y se propaga en las demás direcciones lo que conlleva a un aumento en las ganancias.

Tal y como se realizo para la antena de un elemento, se mostrara a continuación los resultados de la simulación de los parámetros S de la antena MIMO de dos elementos de hasta 50 GHz.

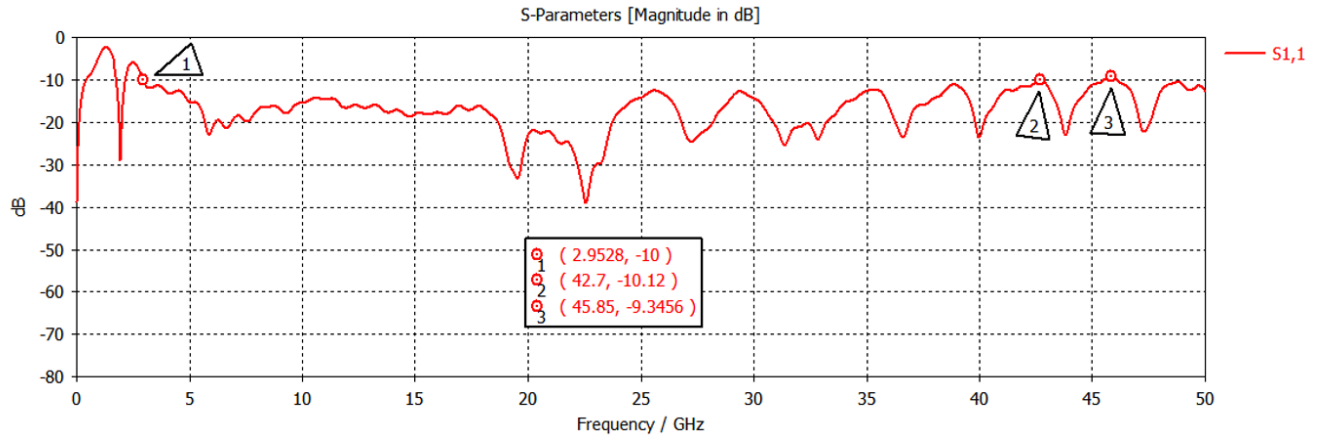


Figura 3.17: S11 - (Antena MIMO de dos elementos; 50 GHz).

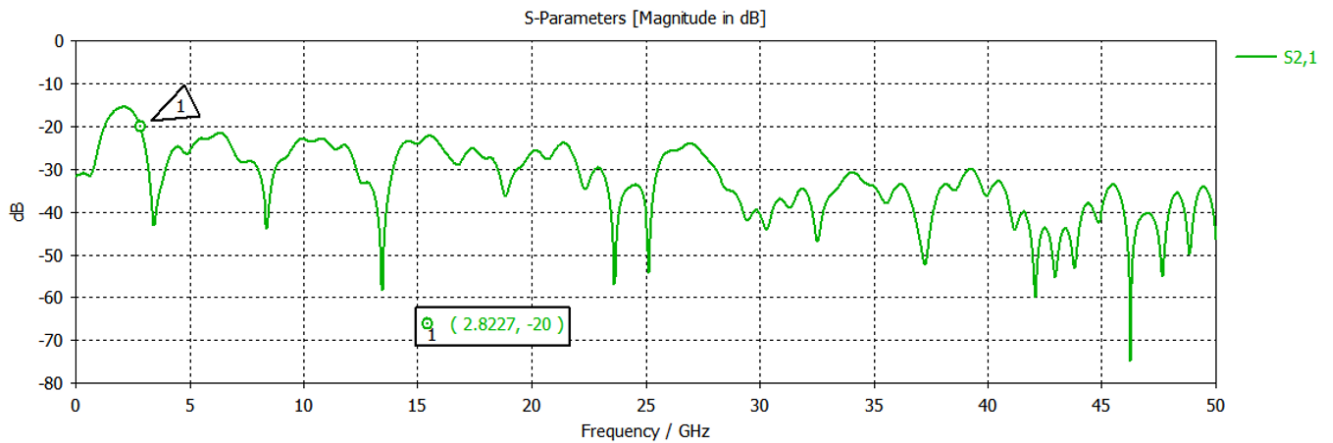


Figura 3.18: S21 - (Antena MIMO de dos elementos; 50 GHz).

Para el parámetro de adaptación, su frecuencia mínima empieza antes que la simulación de 20 GHz, incluso cumple con los requisitos de adaptación establecidos, el único punto de frecuencia que sobrepasa el umbral establecido es la frecuencia 45.85 GHz, para todo lo demás esta por debajo de -10 dB con lo cual se tiene una simulación bastante buena.

En el caso del parámetro de acoplamiento es mejor, la banda de trabajo va desde 2.82 GHz hasta 50 GHz, por lo que la simulación cumple con los requisitos establecidos por el acoplamiento de antenas.

3.2.3. Antena MIMO de cuatro elementos

Finalizando con los diseños, esta es la última antena que se ha diseñado y de la cual, han salido los mejores resultados en comparación con las dos anteriores.

Se tomo como referencia la de dos elementos para diseñar esta antena MIMO de 4 elementos, en primer lugar se hizo un espejo de esta antena, tal y como se hizo en la de dos elementos, creando así 4 elementos en una antena. Este espejo incluye la barrera vertical que hay entre los

elementos laterales, extendiéndose de forma vertical en toda la antena. El aislamiento que se produce entre las antenas laterales es aceptable, sin embargo el aislamiento diagonal y el vertical que se produce no cumple y por ello se procede a poner las barreras correspondientes.

Se procede a añadir una barrera circular en medio de la antena, a medida que se aumentaba o se reducía el círculo, se observaba que seguía sin cumplirse el aislamiento diagonal de los elementos, por ello se coloca una barrera horizontal entre los elementos verticales, en la cara frontal de la antena para conseguir el aislamiento diagonal y el vertical deseados, no obstante seguía sin cumplirse el requisito de acoplamiento.

Por tanto se decidió insertar dos barreras, verticales y horizontales en la parte trasera de la antena y con eso, se obtuvo el aislamiento diagonal entre elementos pero el aislamiento vertical seguía sin salir, por ello se volvió a la cara frontal y se añadió 4 barreras muy finas horizontales tanto arriba como abajo de la barrera horizontal principal, el aislamiento vertical se acercaba al cumplimiento del requisito pero faltaba un poco mas. Como paso final, se puso barreras verticales con una altura desde la barrera fina mas baja hasta la mas alta, probando la anchura adecuada de esas barreras, se obtuvo al final el acoplamiento vertical deseado.

Después de conseguir todos los acoplamientos, se produjo un problema con la adaptación de la antena, para eso se pusieron barreras horizontales justo por encima de los 4 elementos radiantes, con eso se consigue aumentar la eficacia de adaptación de la antena en los 4 elementos.

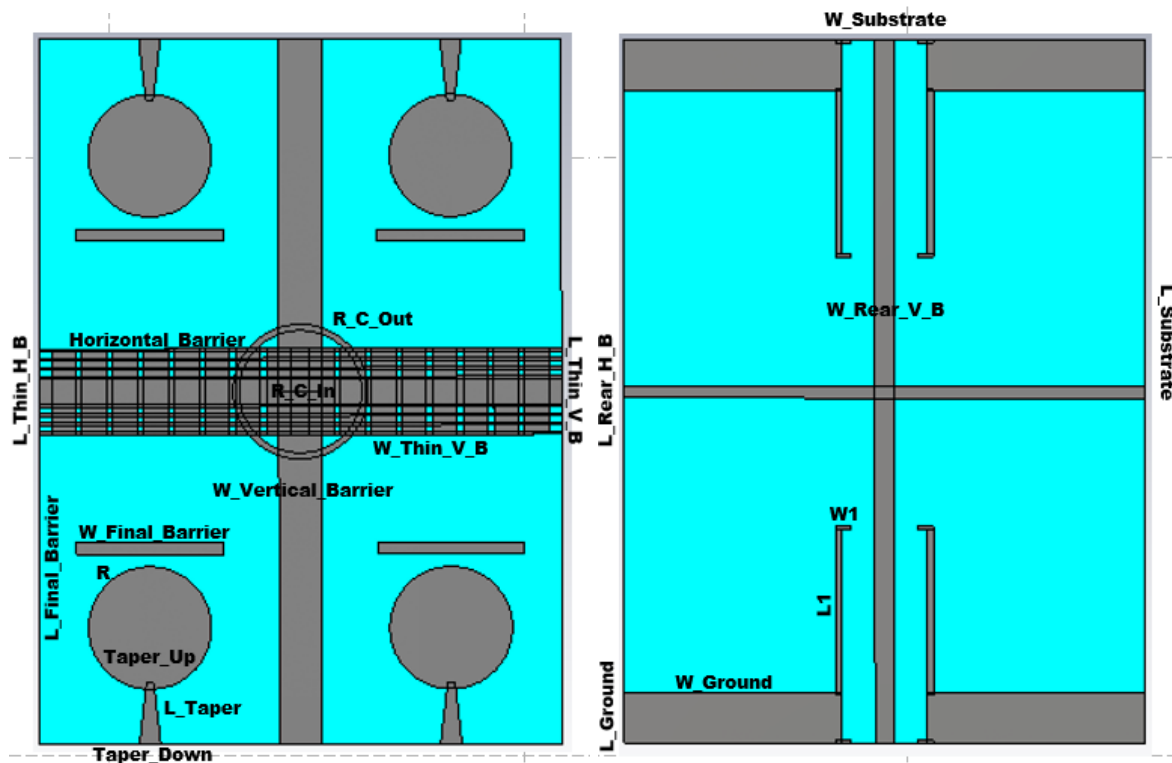


Figura 3.19: Antena MIMO de cuatro elementos

| PARAMETERS | VALUE (mm) |
|--------------------|------------|
| Taper_Up | 1.2 |
| Taper_Down | 3.5 |
| L_Ground | 8.3 |
| W_Ground | 35 |
| L_Substrate | 115 |
| W_Substrate | 85 |
| L_Taper | 10 |
| R | 10 |
| R_C_In | 10 |
| R_C_Out | 11 |
| W_Vertical_Barrier | 7 |
| L_Thin_V_B | 14 |
| W_Thin_V_B | 4 |
| Horizontal_Barrier | 4 |
| Thin_H_B | 0.5 |
| L1 | 27 |
| W1 | 2.5 |
| L_Final_Barrier | 2 |
| W_Final_Barrier | 24 |
| W_Rear_V_B | 3 |
| L_Rear_V_B | 2 |

Tabla 3.13: Parámetros de la Antena MIMO de cuatro elementos.

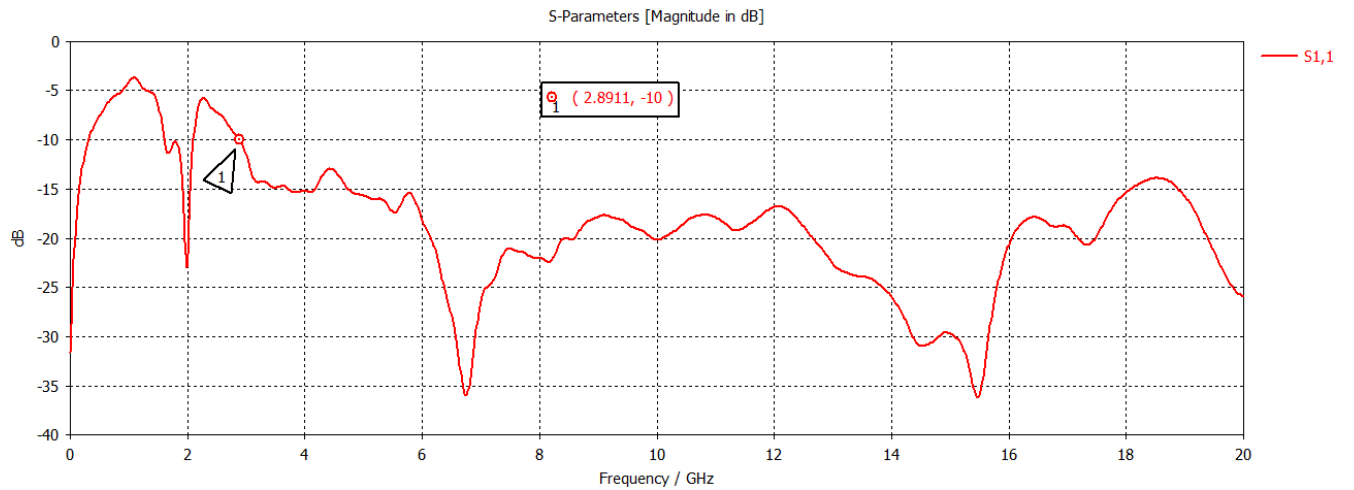


Figura 3.20: S11 - Antena MIMO de cuatro elementos.

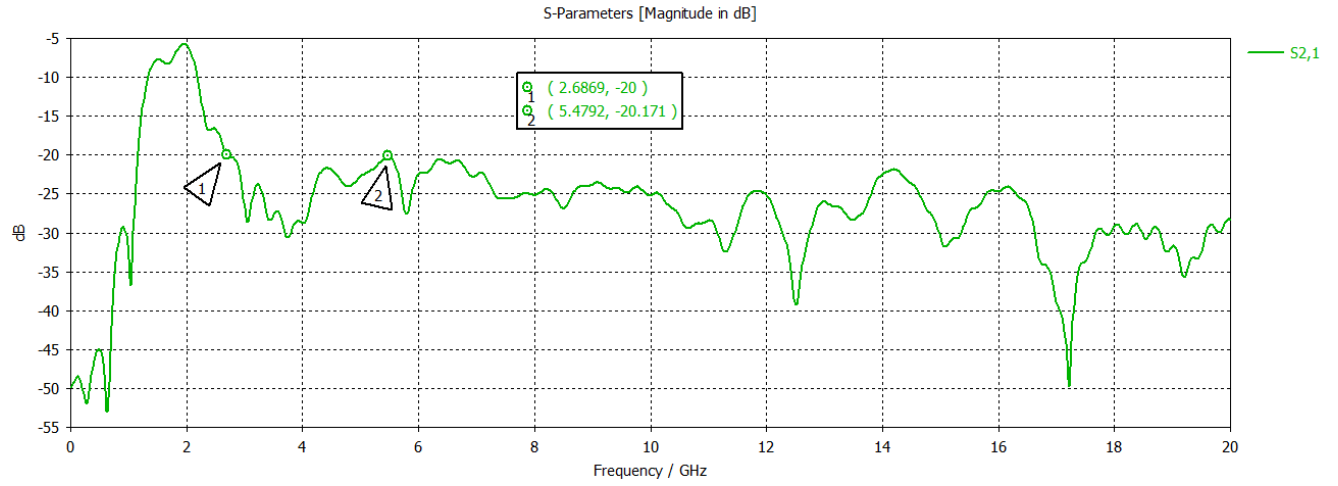


Figura 3.21: S21 - Antena MIMO de cuatro elementos.

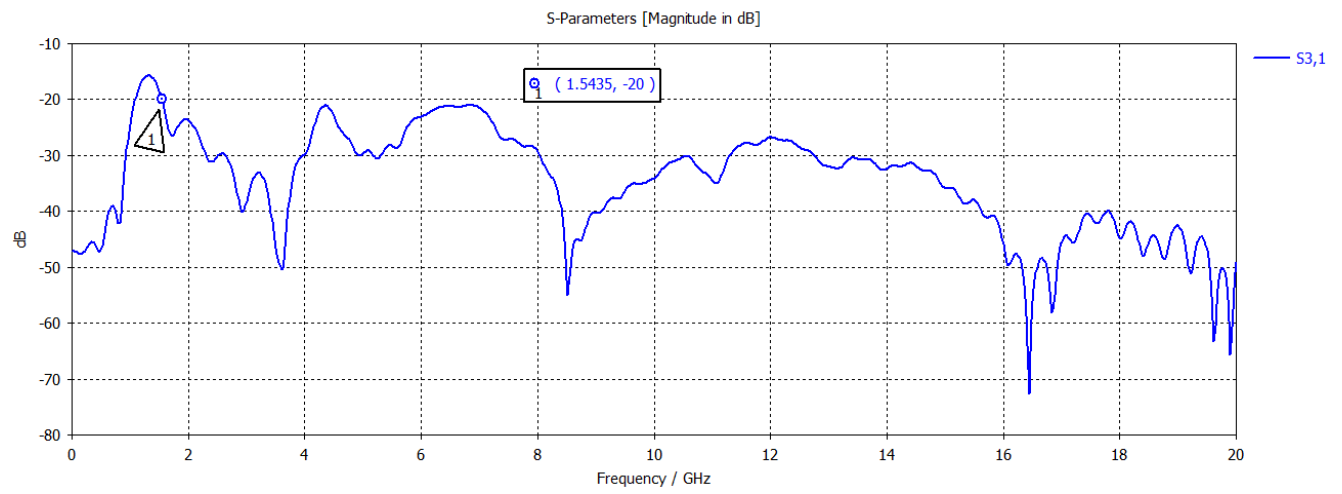


Figura 3.22: S31 - Antena MIMO de cuatro elementos.

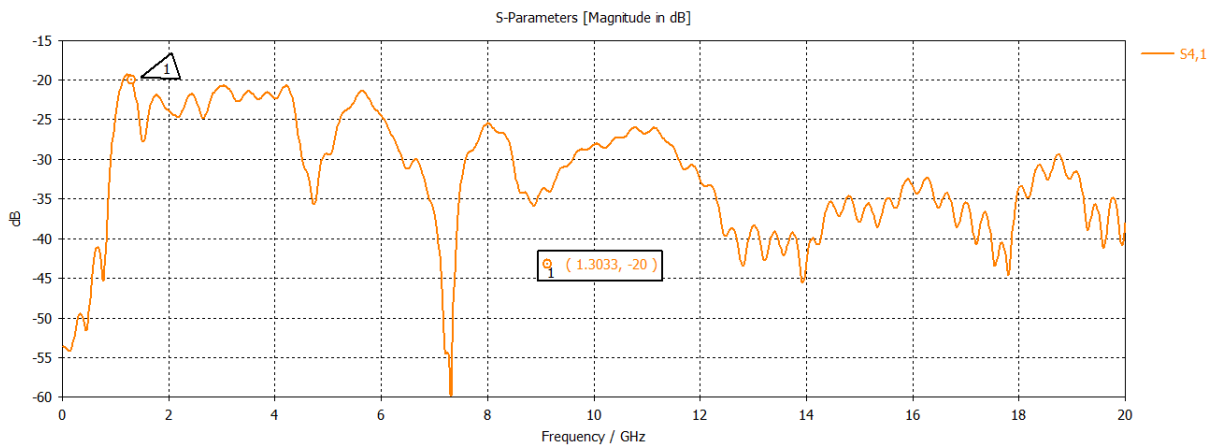


Figura 3.23: S41 - Antena MIMO de cuatro elementos.

La antena MIMO de 4 elementos cumple en todos los aspectos para todos los parámetros tanto para adaptación como para acoplamiento, en adaptación el ancho de banda empieza desde 2.89 GHz hasta 20 GHz. En el caso del acoplamiento para el parámetro S21 el ancho de banda

de acoplamiento empieza desde 2.68 GHz hasta 20 GHz, para el parámetro S31 empieza desde 1.54 GHz hasta 20 GHz lo que conlleva esto a muy buen acoplamiento entre los elementos 1 y 3. Por último, el parámetro S41 empieza desde 1.3 GHz hasta 20 GHz.

Para el resto de parámetros de acoplamiento, comparándola con los parámetros antes mencionados, se observara que el ancho de banda de acoplamiento sera el mismo si la distancia entre los elementos es igual y eso es debido a la simetría de la antenna.

Finalizando con el diseño de esta antenna, se representara a continuación una tabla con las dimensiones:

| DIMENSIÓN | VALOR (mm) |
|-------------|------------|
| Altura | 115 |
| Anchura | 85 |
| Profundidad | 1.584 |

Tabla 3.14: Dimensiones de Antena MIMO de cuatro elementos.

A continuación, los diagramas de radiación en sus diferentes frecuencias de interés:

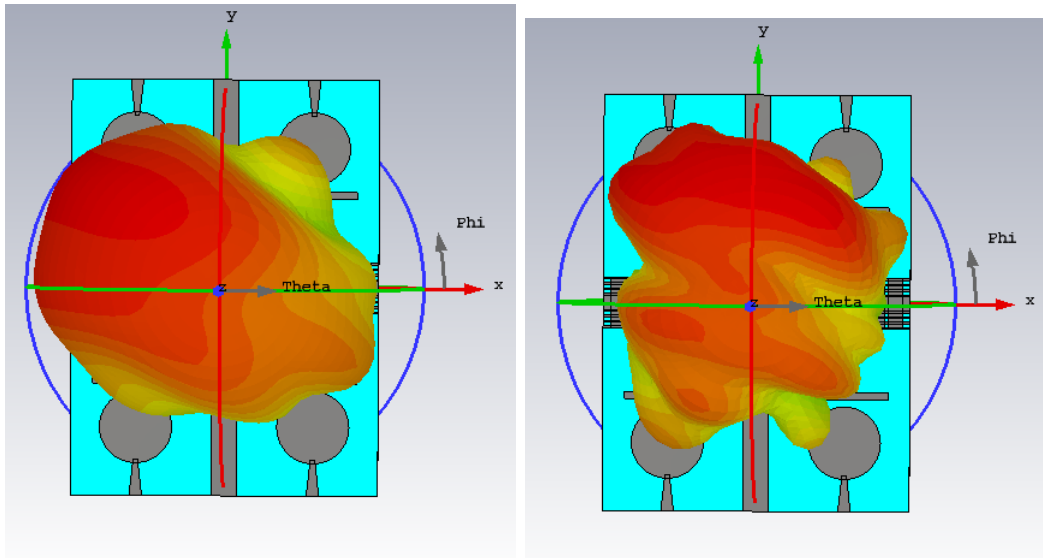


Figura 3.24: Diagramas de radiación para cuatro elementos a 4 y 7 GHz respectivamente

| 4 GHz | | 7 GHz | |
|---|------------|---|------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.3417 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.1195 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.5115 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.1851 dB |
| Directividad | 4.917 dBi | Directividad | 5.747 dBi |
| Ganancia | 4.575 dBi | Ganancia | 5.628 dBi |
| Ganancia Realizada | 4.405 dBi | Ganancia Realizada | 5.562 dBi |

Tabla 3.15: Resultados de los diagramas de radiación a 4 y 7 GHz para cuatro elementos.

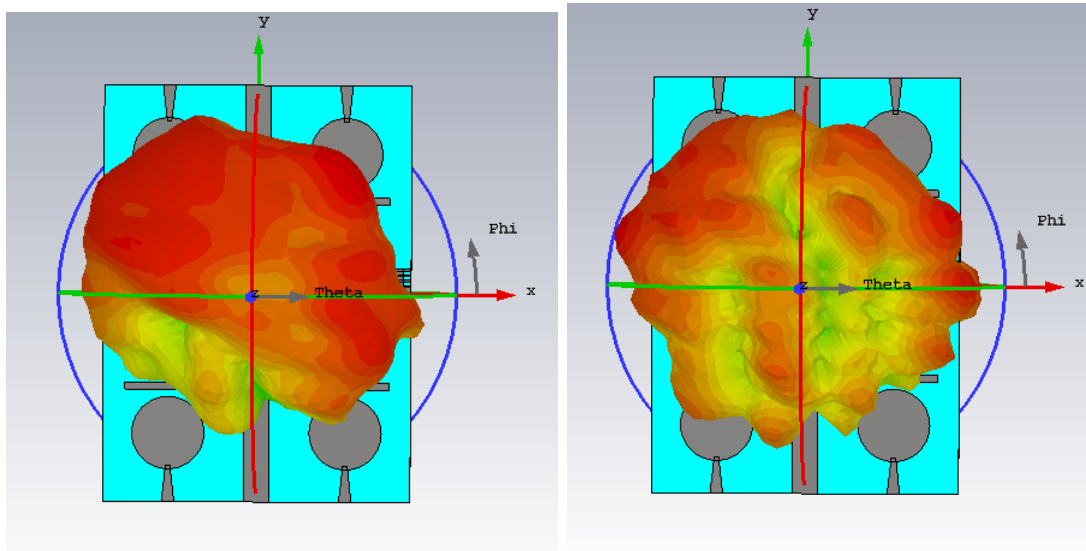


Figura 3.25: Diagramas de radiación para cuatro elementos a 10 y 15 GHz respectivamente

| 10 GHz | | 15 GHz | |
|---|-------------|---|------------|
| Nombre | Valor | Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.07376 dB | Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.2512 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.1373 dB | Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.2614 dB |
| Directividad | 5.566 dBi | Directividad | 6.648 dBi |
| Ganancia | 5.492 dBi | Ganancia | 6.396 dBi |
| Ganancia Realizada | 5.428 dBi | Ganancia Realizada | 6.386 dBi |

Tabla 3.16: Resultados de los diagramas de radiación a 10 y 15 GHz para cuatro elementos.

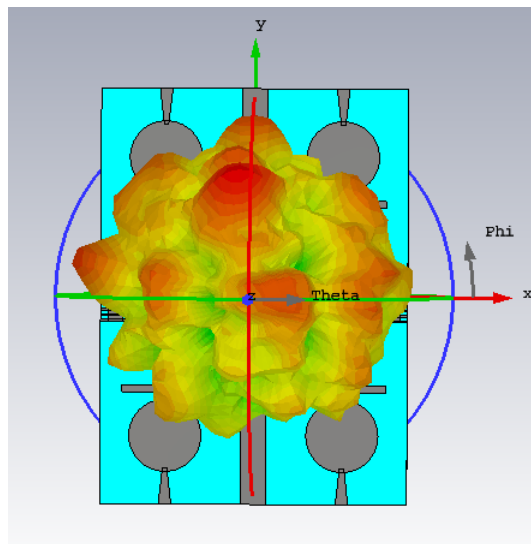


Figura 3.26: Diagrama de radiación para cuatro elementos a 19 GHz

| 19 GHz | |
|---|------------|
| Nombre | Valor |
| Eficiencia de Radiación (ζ_{rad}) | -0.2171 dB |
| Eficiencia Total (ζ_{tot}) | -0.3400 dB |
| Directividad | 8.721 dBi |
| Ganancia | 8.504 dBi |
| Ganancia Realizada | 8.381 dBi |

Tabla 3.17: Resultados del diagrama de radiación a 19 GHz para cuatro elementos.

Según se observa en estos diagramas, que la propagación cuando se propaga en dirección hacia los tres elementos radiantes, esa se desvía y se propaga en otras direcciones. Esto es lo mismo que la antena MIMO de dos elementos pero con la diferencia de que esta vez hay tres elementos en vez de uno.

Otra cosa que se observa es que en el propio elemento en el cual sale la propagación, intenta aislarse de ello, propagándose así hacia arriba del elemento y esto pasa porque el plano de masa del elemento radiante del puerto 1, aísla la propagación en dirección hacia arriba.

Por último, se mostraran los resultados de los parámetros S de la antena MIMO de cuatro elementos de hasta 50 GHz.

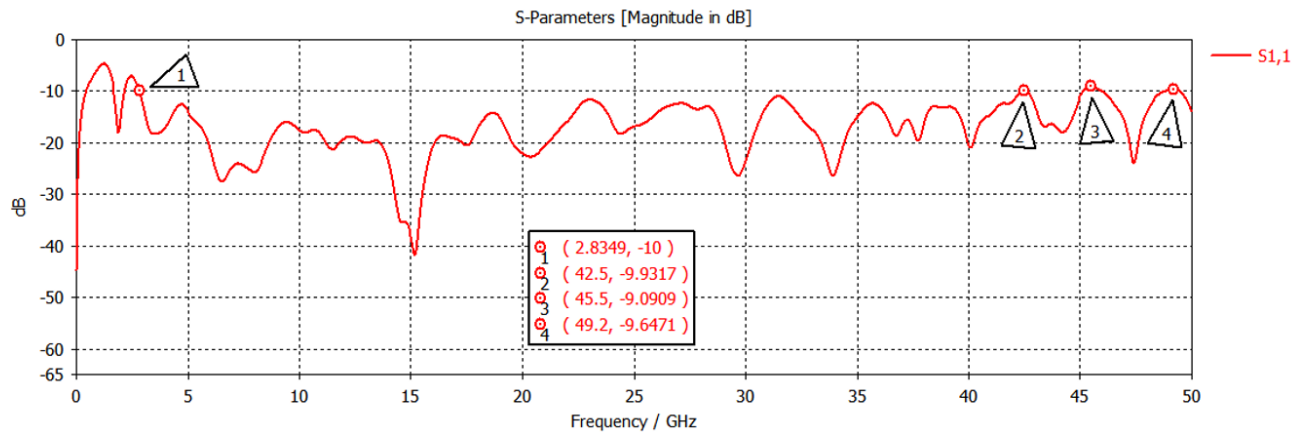


Figura 3.27: S11 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz).

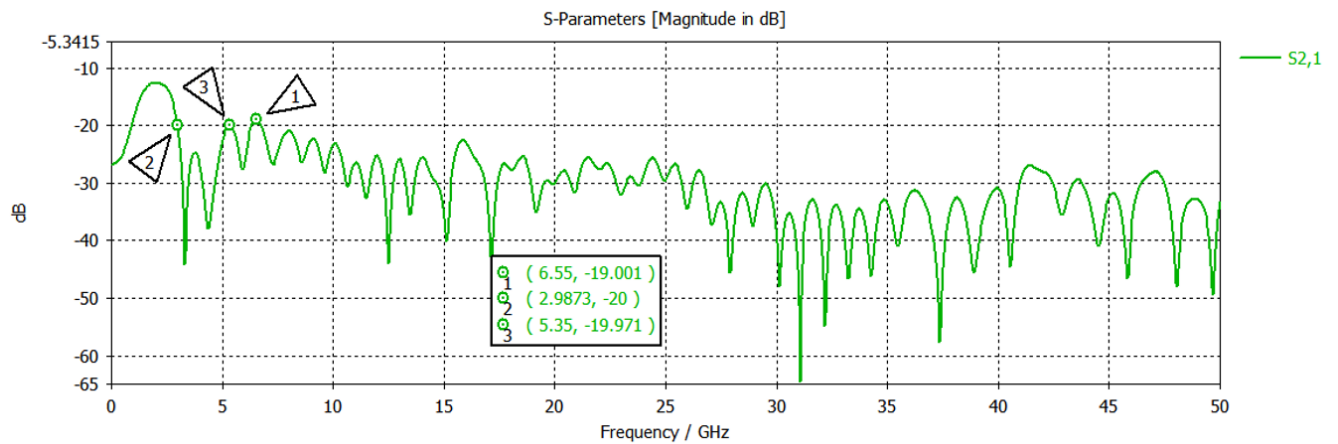


Figura 3.28: S21 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz).

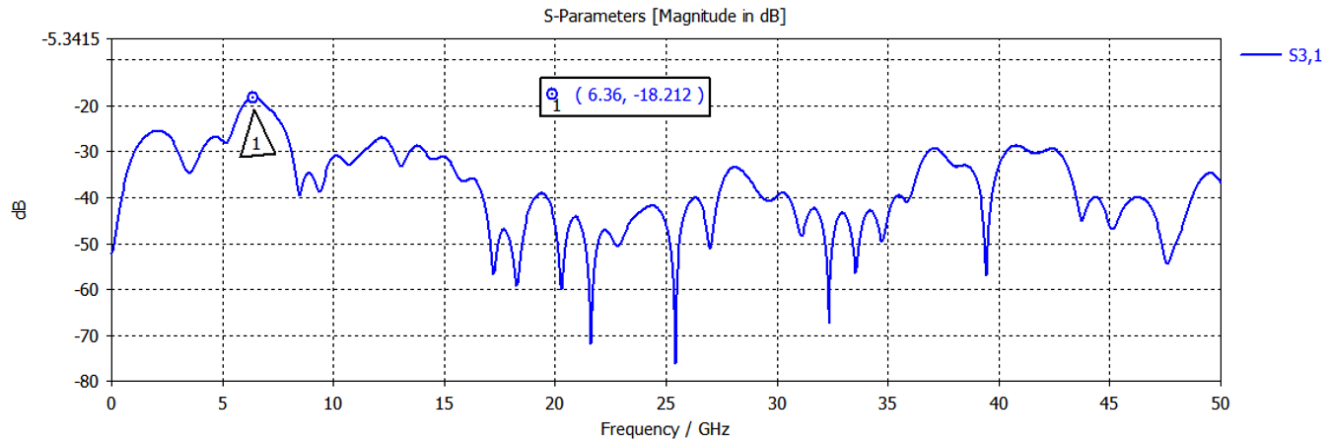


Figura 3.29: S31 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz).

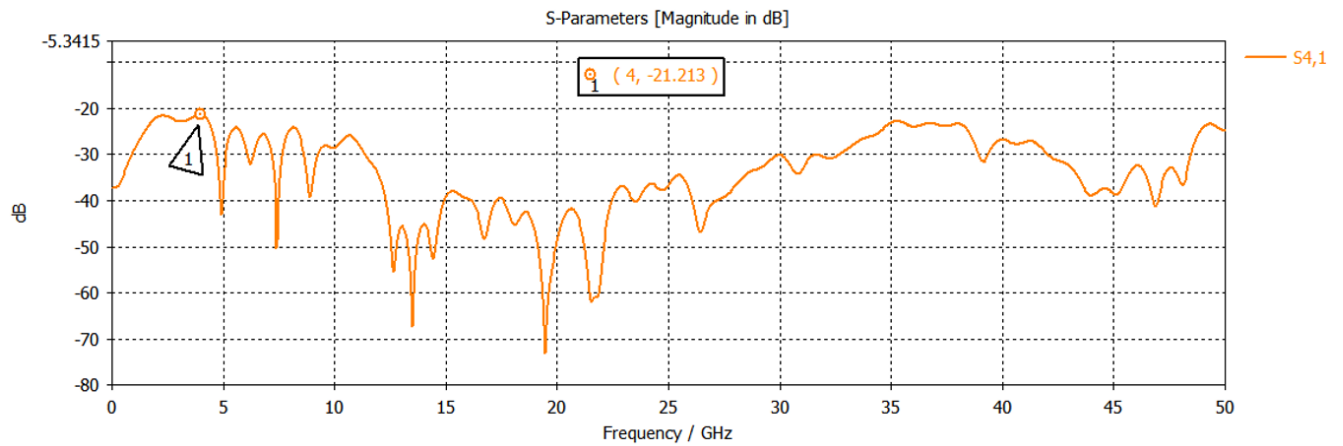


Figura 3.30: S41 - (Antena MIMO de cuatro elementos; 50 GHz).

El parámetro S_{11} que es el de adaptación, su frecuencia mínima es menor que la de la simulación de 20 GHz, no obstante se tiene 3 puntos en esta simulación que superan el umbral establecido pero no son de mucha importancia ya que no es un problema.

Se tiene ahora los parámetros de acoplamiento, el S_{21} su frecuencia mínima empieza después de la simulación de 20 GHz y hay dos puntos que superan el umbral de -20 dB, sin embargo tiene un comportamiento descendiente a medida que aumenta la frecuencia. Para el parámetro S_{31} solo tiene un punto que supera el umbral de acoplamiento pero su banda de trabajo empieza en 0 y llega hasta 50 GHz según la simulación. Por último el parámetro S_{41} su banda de trabajo es desde 0 hasta 50 GHz y no hay ningún punto que supere el umbral de -20 dB, con lo cual es la mejor simulación de 50 GHz que se ha obtenido.

4

Resultados Prácticos

El proceso de la implementación se hizo a través de los ficheros Gerbers obtenidos a través del programa CST, esos ficheros se introdujeron en una maquina de implementación (LPKF ProtoMat S100 circuit board plotter) ubicada en el taller del edificio C de la facultad EPS.

Posteriormente, fueron llevadas a la cámara anecoica para la soldadura de los conectores en los puertos de las antenas, con la ayuda del estaño y un soldador ha sido eso posible. Luego la utilización de unos cables para el proceso de calibración, medición y de un analizador de frecuencias (AGILENT E-5071C Network Analyzer) de la marca Agilent Technologies para hacer las medidas correspondientes de las antenas.



Figura 4.1: Equipamiento para soldar y medir

En primer lugar diseñamos la antena de un elemento para luego en su posterioridad, implementar las dos Antenas MIMO, no obstante la antena de un elemento tiene que cumplir con el requisito de adaptación de su parámetro S_{11} , haciendo la medición de la antena de un elemento observamos que cumple con ello e incluso los resultados son mucho mejores que los teóricos, observamos que la banda de trabajo empieza mucho antes.

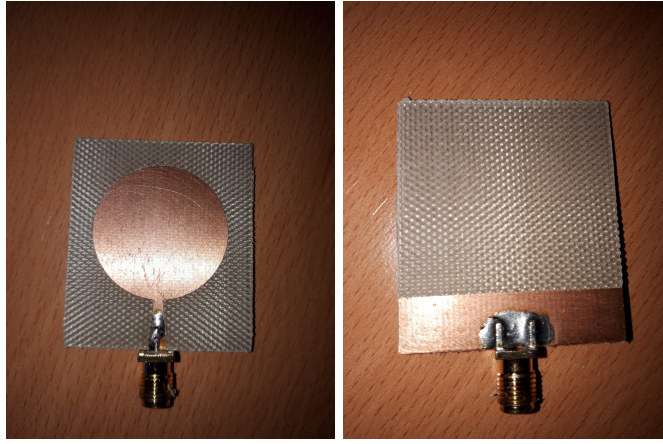


Figura 4.2: Aspecto Físico de la Antena de un Elemento

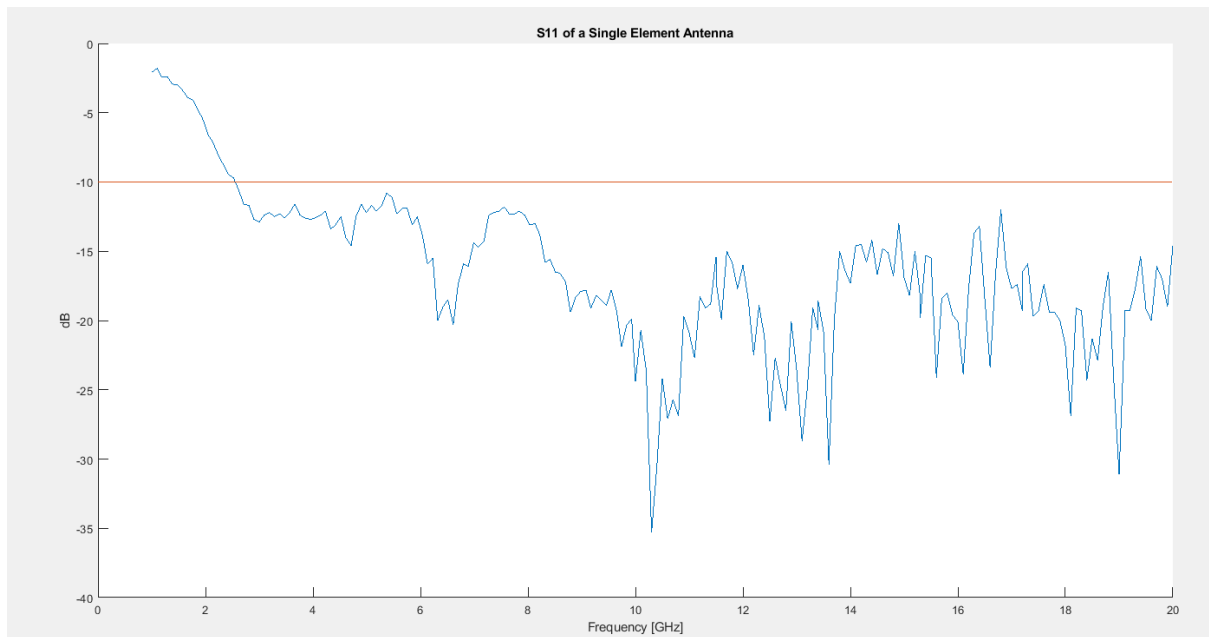


Figura 4.3: S11 de la Antena de un Elemento (Resultado Práctico)

En segundo lugar, para la antena MIMO de dos elementos se presentaran solo los parámetros S_{11} y S_{21} haciendo referencia al puerto 1, por ser simétrico el $S_{22} = S_{11}$ y $S_{12} = S_{21}$.

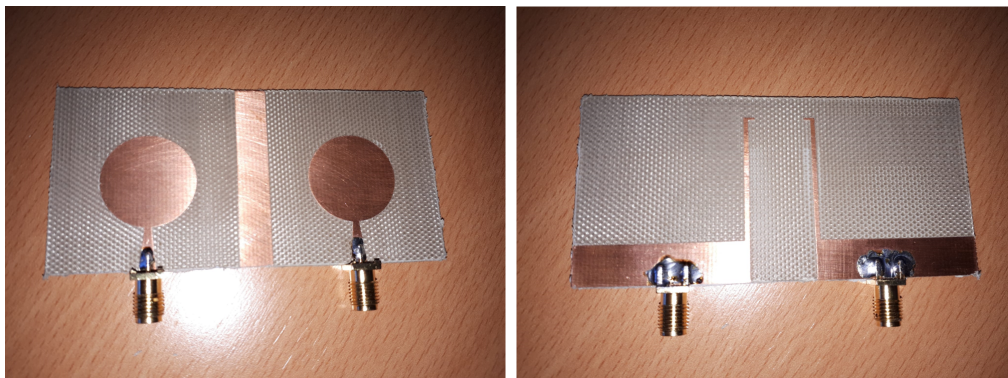


Figura 4.4: Aspecto Físico de la Antena MIMO de dos Elementos

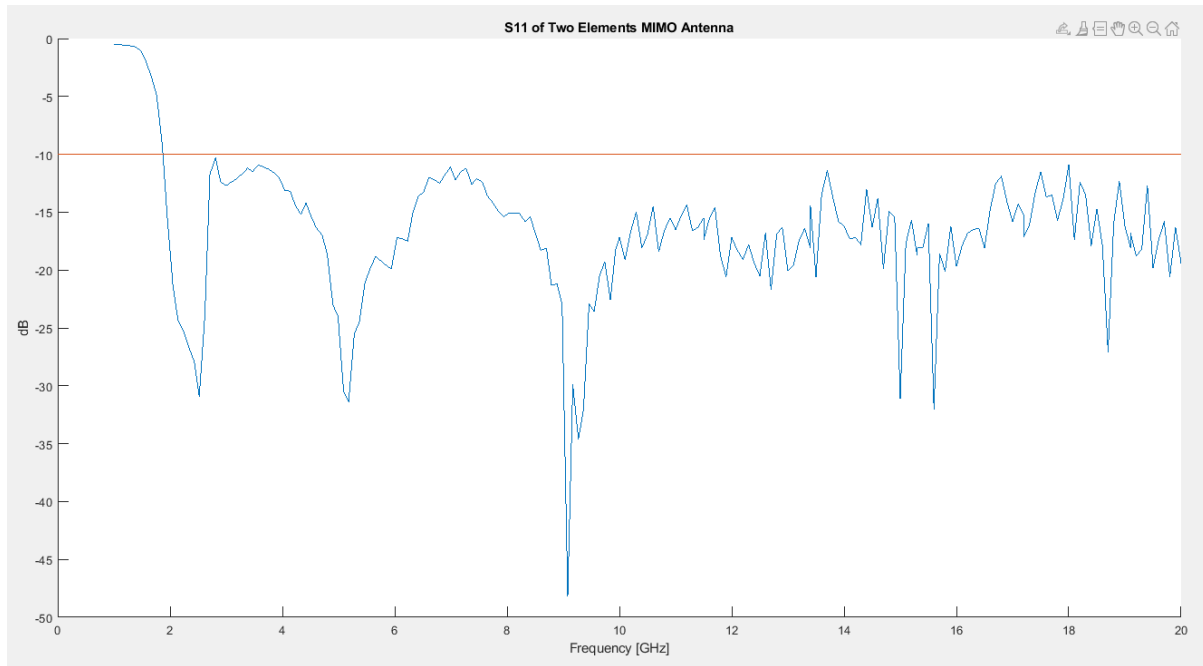


Figura 4.5: S11 de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico)

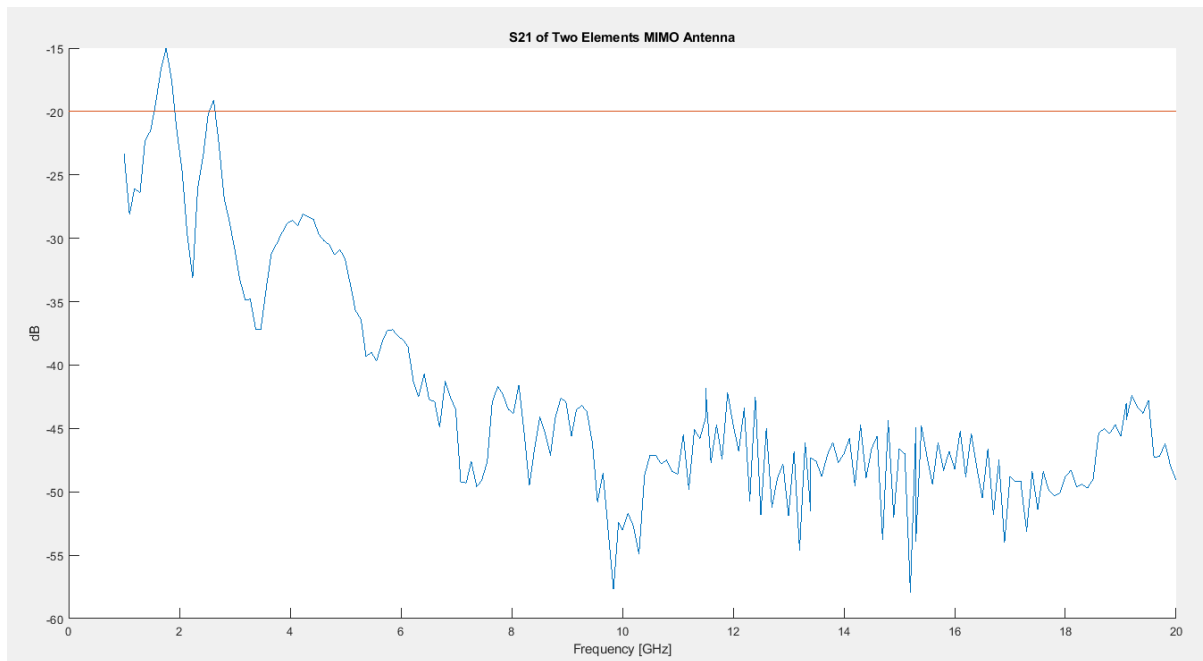


Figura 4.6: S21 de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico)

Se puede ver que los dos parámetros, además de cumplir con los criterios muestra una mejora con respecto a los resultados teóricos tal y como se esperaba, las bandas de trabajo son mas amplias que las teóricas. Para el caso del parámetro S21, la frecuencia mínima empieza en torno a 2.7 GHz.

Al ser una antena MIMO de dos elementos, se hará una presentación de dos parámetros de calidad, uno es el coeficiente de correlación de envolvente (ECC) que tiene en cuenta la forma del patrón de radiación de las antenas, la polarización e incluso la fase relativa de los campos entre los dos elementos radiante. El otro es la ganancia de diversidad y se van a presentar en

la banda de trabajo para S_{11} , S_{22} por debajo de -10 dB y S_{21} , S_{12} por debajo de -20 dB, los cuatro cumplidos. La ECC de una antena perfecta es igual a 0 y su ganancia de diversidad es 10 dB en toda la banda. La fórmula de la ECC es la siguiente:

$$ECC = \frac{|S_{11} * S_{12} + S_{21} * S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][(1 - |S_{12}|^2|S_{22}|^2)]} \quad (4.1)$$

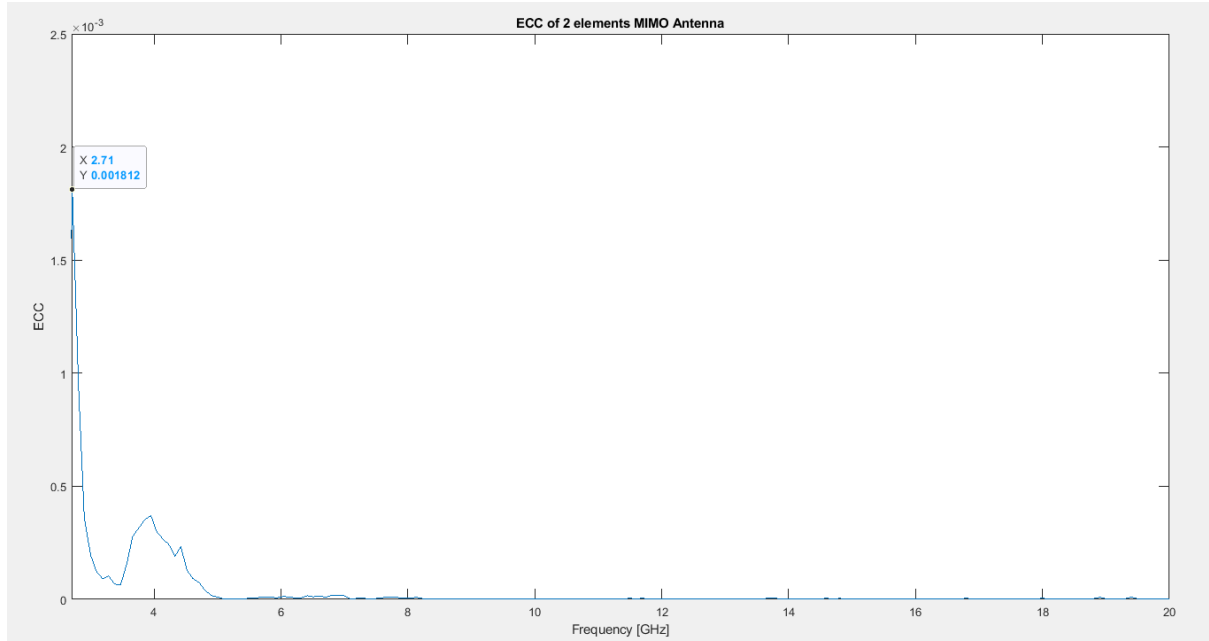


Figura 4.7: ECC de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico)

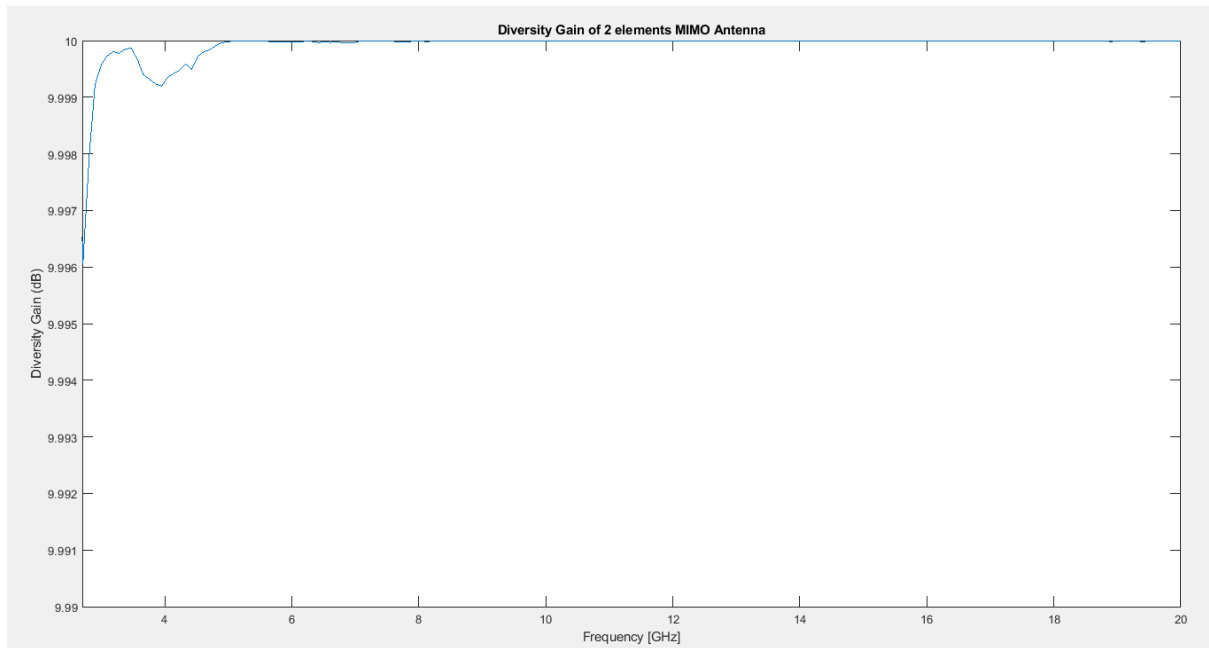


Figura 4.8: La Ganancia de Diversidad de la Antena MIMO de dos elementos (Resultado Práctico)

Para el ECC no hay ningún punto en toda la banda de trabajo que valga 0.005 o que este por encima, porque no hay ningún punto que sea malo, es decir para el parámetro S_{11} esta por debajo de -10 dB y para el S_{21} esta por debajo de -20 dB, se escogió como frecuencia mínima el

2.7 GHz ya que, para el parámetro de acoplamiento empieza después del parámetro de reflexión, si se hubiese escogido la frecuencia mínima del parámetro de reflexión, se tendría puntos entre esa frecuencia y la frecuencia de 2.7 GHz que valgan 0.005 o mas. Por ello se escoge una banda de trabajo en la que los dos parámetros coincidan en todos los puntos que estén por debajo de los dB correspondientes a sus criterios de diseño.

Con respecto a la ganancia de diversidad, se empezó también desde 2.7 GHz como frecuencia mínima, el peor punto a 2.7 GHz vale 9.996 dB, a medida que va aumentando la frecuencia, la gráfica se va estabilizando hasta conseguir los 10 dB, se puede observar que en la mayoría de los puntos en la banda de trabajo, sus valores son de 10 dB, lo cual esta antenna esta muy bien diseñada.

En tercer y último lugar, tenemos la antenna MIMO de cuatro elementos, por la misma razón que en el caso de la antenna MIMO de dos elementos, se representaran los parámetros S_{11} , S_{21} , S_{31} y S_{41} haciendo referencia al puerto 1.

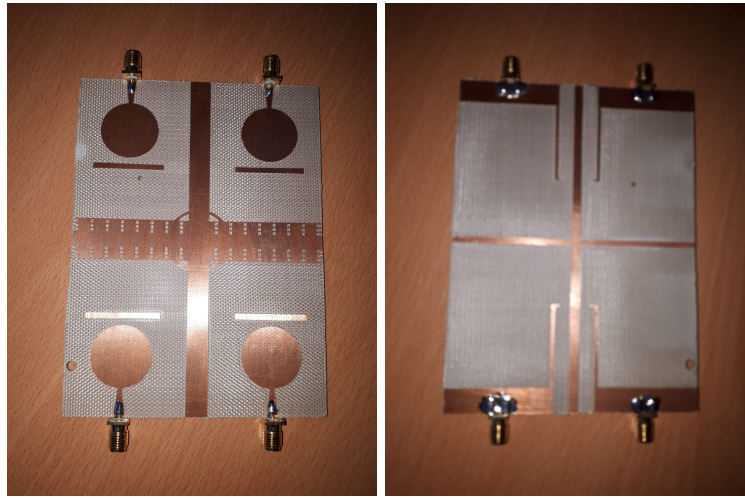


Figura 4.9: Aspecto Físico de la Antena MIMO de cuatro Elementos

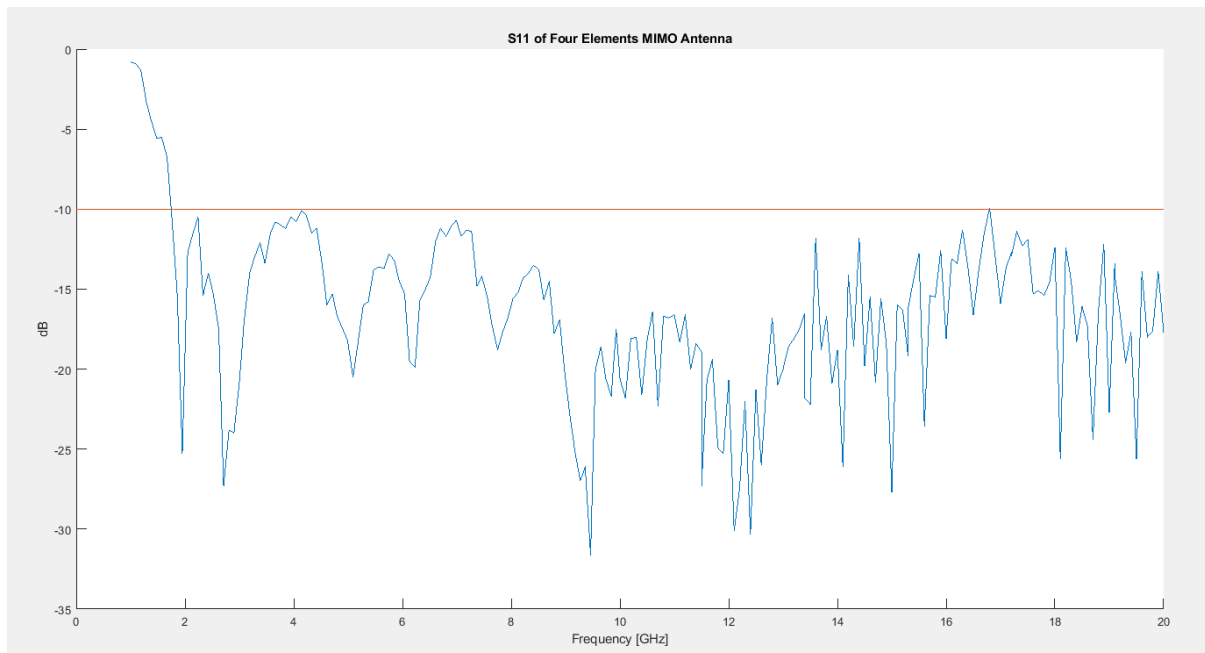


Figura 4.10: S11 de la Antena MIMO de cuatro elementos (Resultado Práctico)

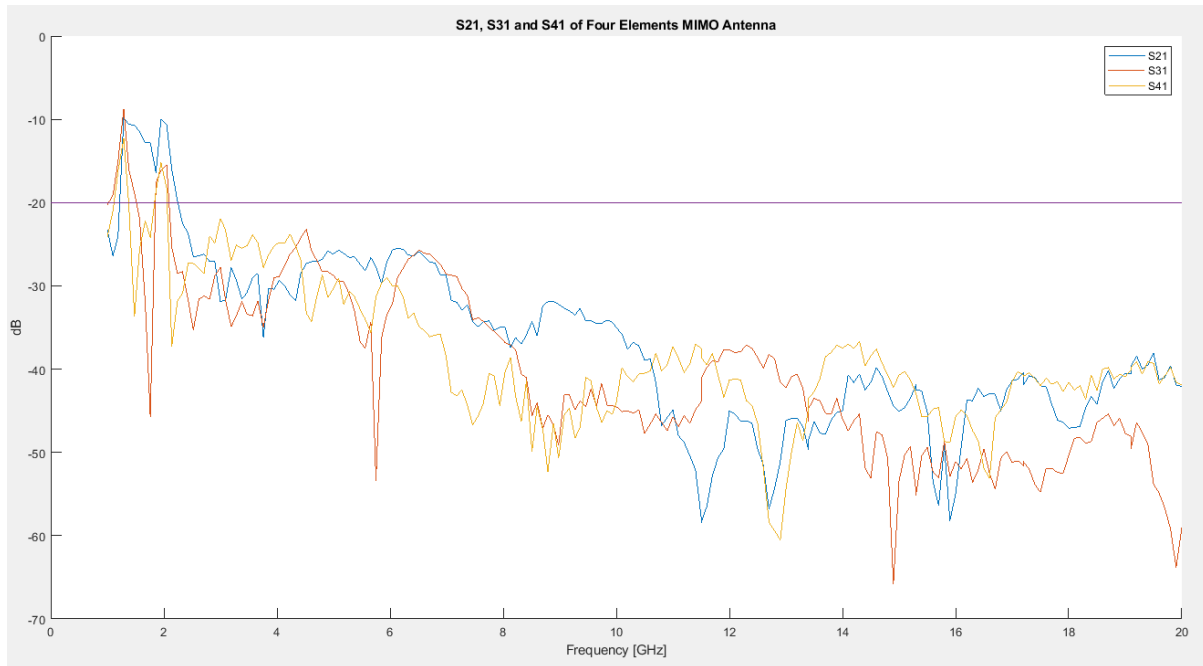


Figura 4.11: S_{21} , S_{31} y S_{41} de la Antena MIMO de cuatro elementos (Resultado Práctico)

Los resultados de los cuatro parámetros son mejores en el caso práctico que el teórico como se esperaba, para el parámetro S_{11} su frecuencia mínima empieza en 1.755 GHz, S_{21} su frecuencia mínima empieza en 2.24 GHz, S_{31} su frecuencia mínima empieza en 2.1 GHz y S_{41} su frecuencia mínima empieza en 2.075 GHz. Para el caso de los parámetros de calidad como vemos que los cuatro parámetros S cumplen con sus respectivos criterios de diseño como en el caso de la antena MIMO de dos elementos, no hace falta volver a dibujar las dos gráficas porque van a salir los mismos resultados.

5

Conclusiones y trabajo futuro

Se concluye que se han diseñado y fabricado dos antenas MIMO. Para ello se ha diseñado primero una antena de un elemento para facilitar el diseño de las antenas MIMO de dos y cuatro elementos. Se han realizado simulaciones y se han comparado con los resultados prácticos y todos sus parámetros S tienen una frecuencia máxima de 20 GHz (por la limitación de los equipos de medida en nuestra escuela) y por eso la misma frecuencia máxima para la simulación. A continuación se presenta una tabla en la cual se verán, cuales son las bandas de trabajo de las tres antenas, comparando el caso teórico con el práctico:

| Antenas | Teórico (f_{min}) [GHz] | Práctico (f_{min}) [GHz] |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Antena de un elemento | 2.78 | 2.55 |
| Antena MIMO de dos elementos | 3.3 | 2.7 |
| Antena MIMO de cuatro elementos | 2.89 | 2.24 |

Tabla 5.1: Comparación de resultados teóricos con prácticos para las tres antenas.

Como conclusión final, la banda de trabajo del caso práctico es mas grande que la del caso teórico en las tres antenas.

Para un trabajo futuro, se contempla diseñar y fabricar unas antenas mas compactas con diferentes formas de los elementos radiantes y también se contempla tomar las antenas MIMO e implementar una barrera vertical perpendicular al plano de las antenas MIMO para conseguir una antenas MIMO en 3D. El objetivo de esta técnica es reducir el campo cercano que se acopla de una elemento radiantes a los demás elementos radiantes de la antena MIMO y así aumentar mas el aislamiento.

Glosario de acrónimos

- **MIMO:** *Multiple-input Multiple-output*
- **GHz:** *Gigahercio*
- **IEEE:** *Institue of Electrical and Electronics Engineers*
- **STC:** *Space-Time Coding*
- **dB:** *Decibelio*
- **Mbps:** *Mega bits por segundo*
- **MHz:** *Megahercio*
- **UWB:** *Ultra Wide Band*
- **WPAN:** *Wireless Personal Area Network*
- **WUSB:** *Wireless Universal Serial Bus*
- **PEC:** *Perfect Electric Conductor*
- **EPS:** *Escuela Politécnica Superior*
- **ECC:** *Envelope Correlation Coefficient*

Bibliografía

- [1] Masa Campos Jose Luis. *Transparencias de la asignatura de Antenas y Compatibilidad Electromagnética*. UAM, 2019-2020.
- [2] Ruiz Cruz Jorge Alfonso. *Medios de Transmisión*. UAM, 2014-2015.
- [3] 145-1973 - "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas". pages 1–18, August 1973.
- [4] Andrews Angus P Grewal, Mohinder S and Lawrence R Weill. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, chapter 3, 4 and 5. John Wiley Sons, Inc, Hoboken, New Jersey and Canada Simultaneously, 2 edition, 2007.
- [5] D.M. Pozar. "Microstrip Antennas". *Proceedings of the IEEE*, Volume 80(no.1):pp.79–91, January 1992.
- [6] Hussaini R. A. Abd-Alhameed C. H. See2 M. B. Child I.T.E. Elfergani, Abubakar Sadiq and Jonathan Rodriguez. "Design of a compact tuned antenna system for a mobile MIMO applications". *2012 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*, pages 1–4, January 2013.
- [7] Jaekyun Moon and Younggyun Kim. "Antenna Diversity Strengthens Wireless LANs". *EE/Times*, pages 15–16;18–19;22, January 2003.
- [8] N. Seshadri V. Tarokh and A.R. Calderbank. "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction". *IEEE Transactions on Information Theory*, Volume 44(no.2):pp.744–765, March 1998.
- [9] A. Balanis Constantine. *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley Sons, Inc, 2 edition, July 1996.
- [10] Federal Communications Commission. "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems". Volume 42:pp.1–17, April 2002.
- [11] Choi Look Law Yuan, Zhou and Xia Jingjing. "Ultra low-power UWB-RFID system for precise location-aware applications". *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, June 2012.



Anexo: Planos Polares

En este apéndice se verán los diferentes comportamientos que tienen los planos E y H a las frecuencias de interés para las tres antenas, para ello se utilizan los diagramas de radiación en planos polares donde se reflejarán los anchos de haz en grados, que son las dos líneas azules claras y la dirección del lóbulo principal en grados también que será la línea azul oscura.

Los anchos de haz y las direcciones de los lóbulos principales se incluirán en tres tablas, para cada tabla irá asociada a una antena al final de la representación de los planos polares para cada antena y se explicarán los resultados obtenidos.

A.1. Antena de un elemento

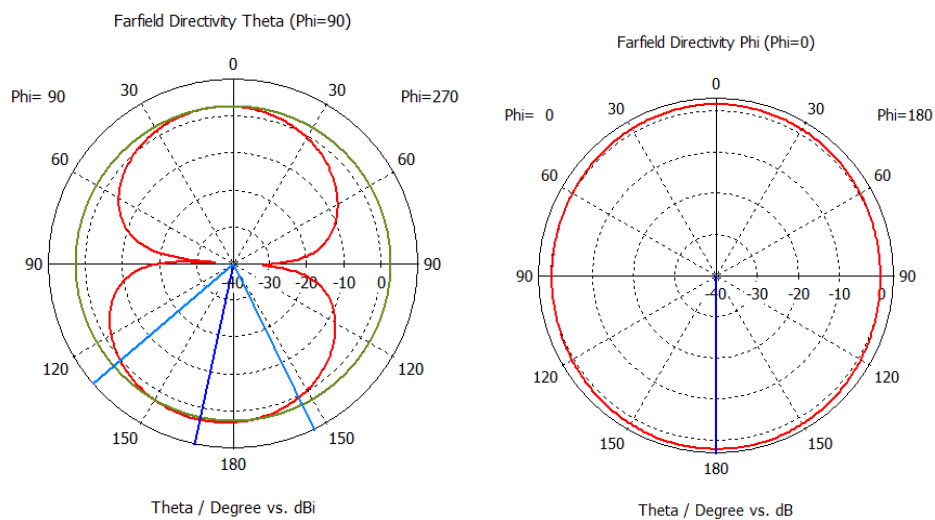


Figura A.1: 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz

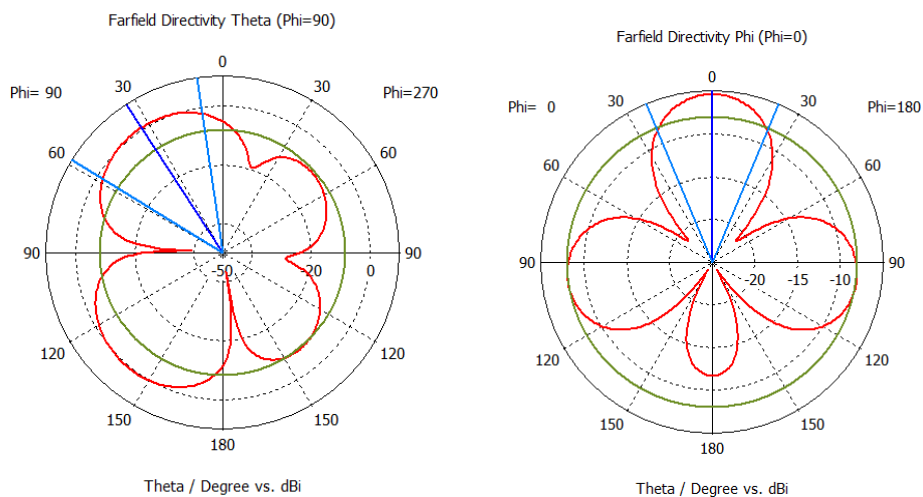


Figura A.2: 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz

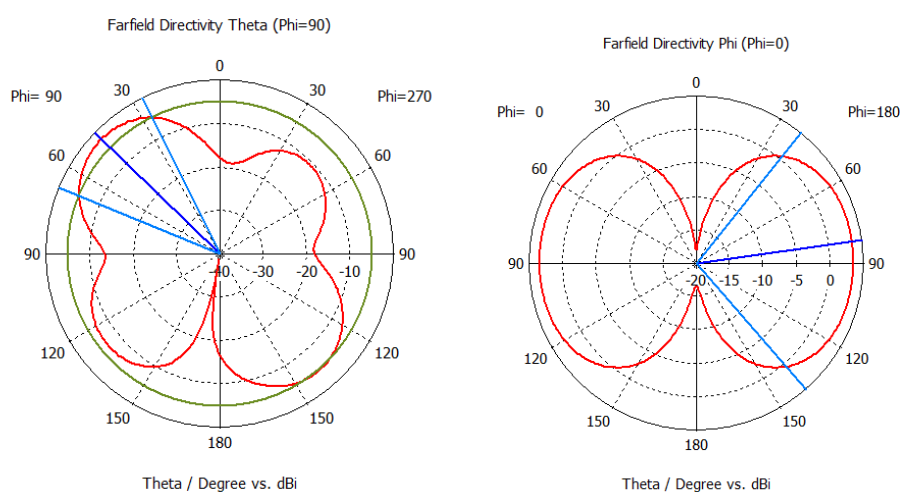


Figura A.3: 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz

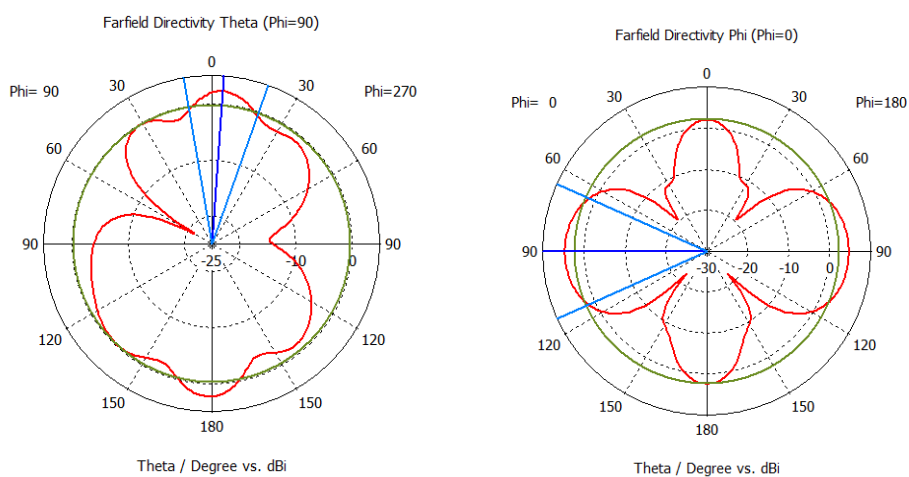


Figura A.4: 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz

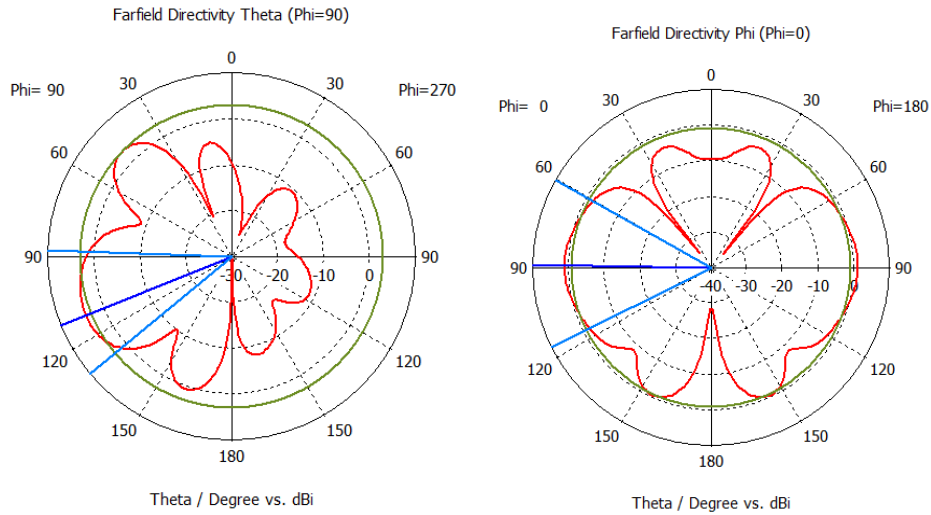


Figura A.5: 1 elemento - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz

| Freq. | Plane E | | Plane H | |
|--------|----------------|------------------|----------------|-----------------------|
| | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) |
| 4 GHz | 168 deg | 75.5 deg | 180 deg | Quasi-Omnidirectional |
| 7 GHz | 33 deg | 49.9 deg | 0 deg | 45.7 deg |
| 10 GHz | 46 deg | 41.1 deg | 82 deg | 100.4 deg |
| 15 GHz | 4 deg | 29 deg | 90 deg | 48.3 deg |
| 19 GHz | 112 deg | 41.6 deg | 89 deg | 56 deg |

Tabla A.1: Antena de un elemento (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal).

Se observa que para el Plano E a medida que aumenta la frecuencia, el ancho de haz se va reduciendo y eso es compatible con los diagramas de radiación en 3D de la antena de un elemento, a medida que aumenta la frecuencia la ganancia aumenta y con ello el ancho de haz se va reduciendo y llega en un punto de la frecuencia que vuelve a aumentar el ancho de haz.

Para el plano H cabe destacar que el ancho de haz a 4 GHz es cuasi-omnidireccional, tiene un comportamiento de omnidireccional pero no se propaga de manera perfecta en todas las direcciones.

A.2. Antena MIMO de dos elementos

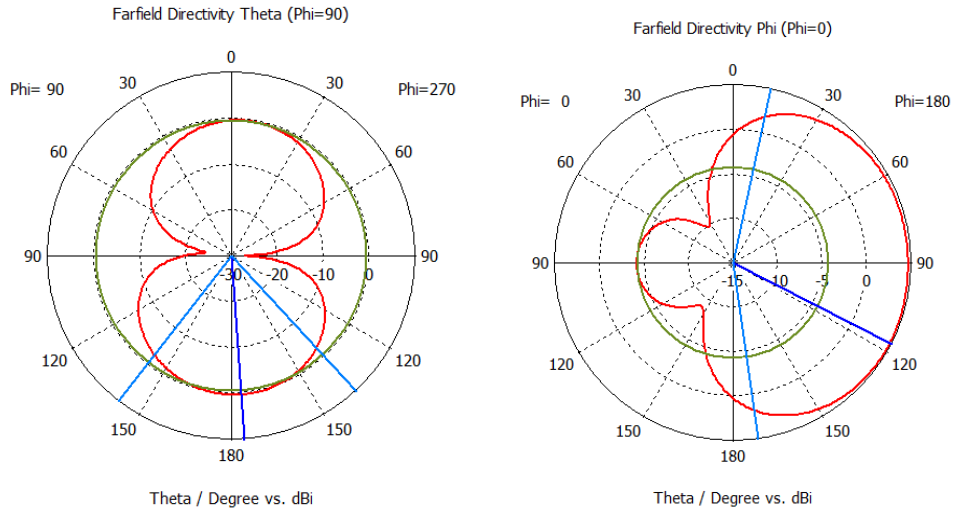


Figura A.6: 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz

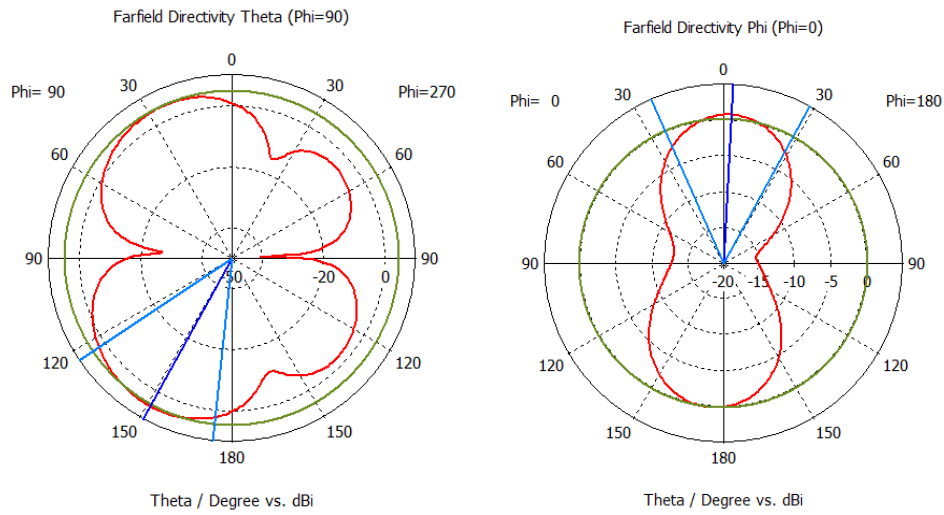


Figura A.7: 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz

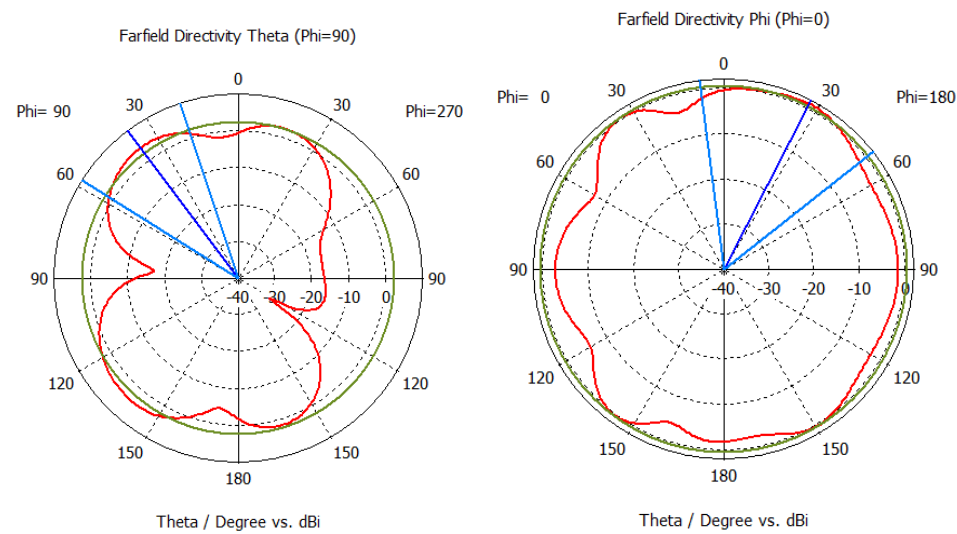


Figura A.8: 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz

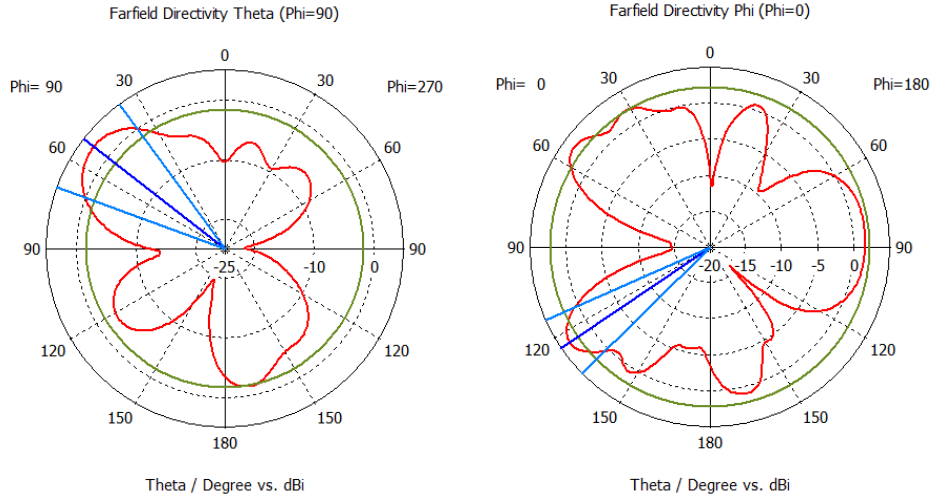


Figura A.9: 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz

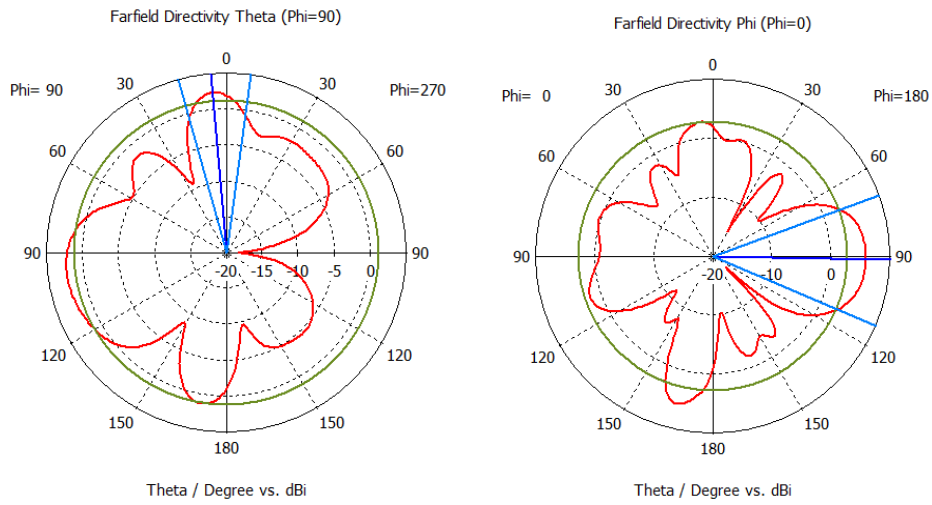


Figura A.10: 2 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz

| Freq. | Plane E | | Plane H | |
|--------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) |
| 4 GHz | 176 deg | 80.6 deg | 117 deg | 160 deg |
| 7 GHz | 151 deg | 50.2 deg | 3 deg | 52.7 deg |
| 10 GHz | 37 deg | 39.6 deg | 27 deg | 58.9 deg |
| 15 GHz | 52 deg | 33.7 deg | 124 deg | 20.8 deg |
| 19 GHz | 5 deg | 23.1 deg | 91 deg | 43.3 deg |

Tabla A.2: Antena MIMO de dos elementos (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal).

Del mismo modo como esta pasando en la antena de un elemento, a medida que aumenta la frecuencia el ancho de haz va reduciéndose en grados y eso es debido al aumento de ganancia.

Igual para el plano H pero en comparación con el plano E, llega un momento en el que el plano H aumenta su ancho de haz en una determinada frecuencia.

A.3. Antena MIMO de cuatro elementos

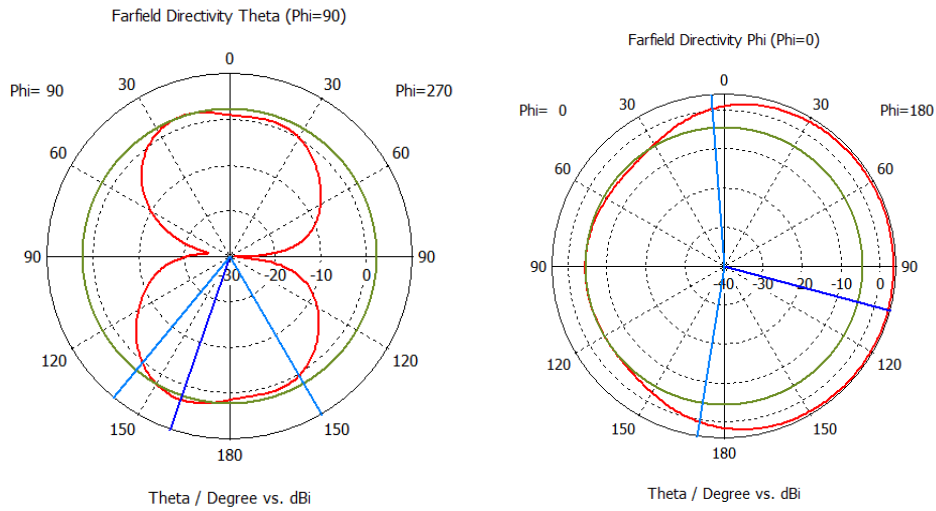


Figura A.11: 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 4 GHz

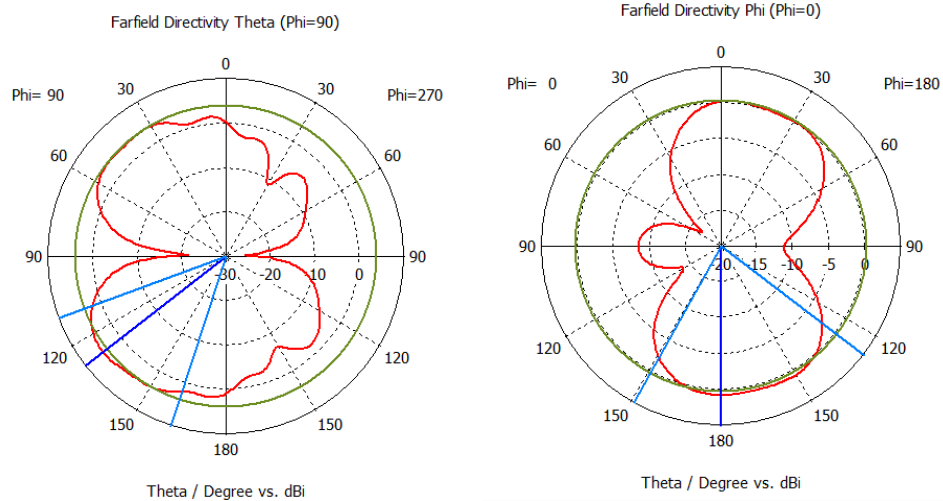


Figura A.12: 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 7 GHz

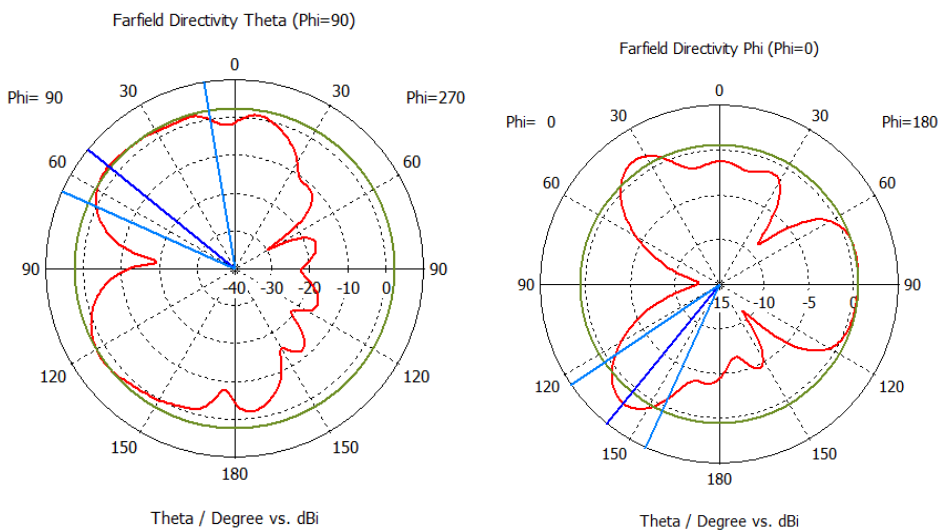


Figura A.13: 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 10 GHz

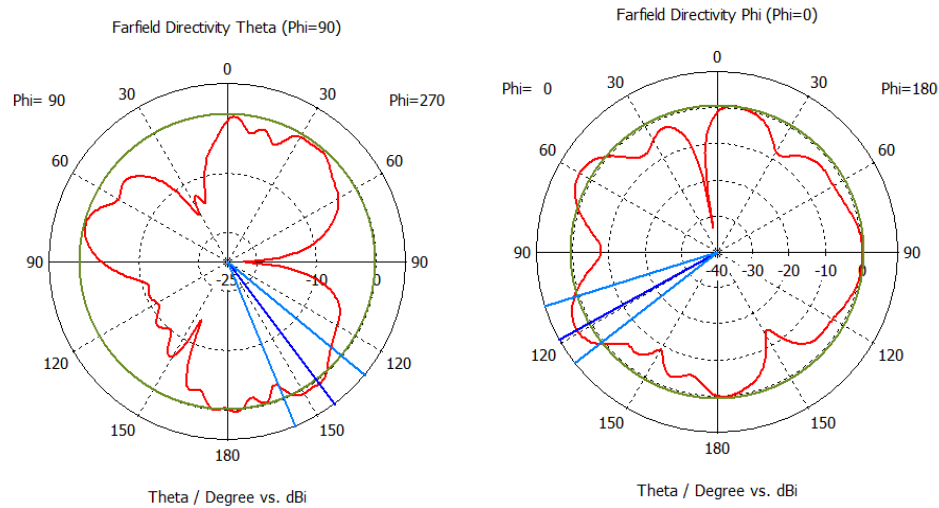


Figura A.14: 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 15 GHz

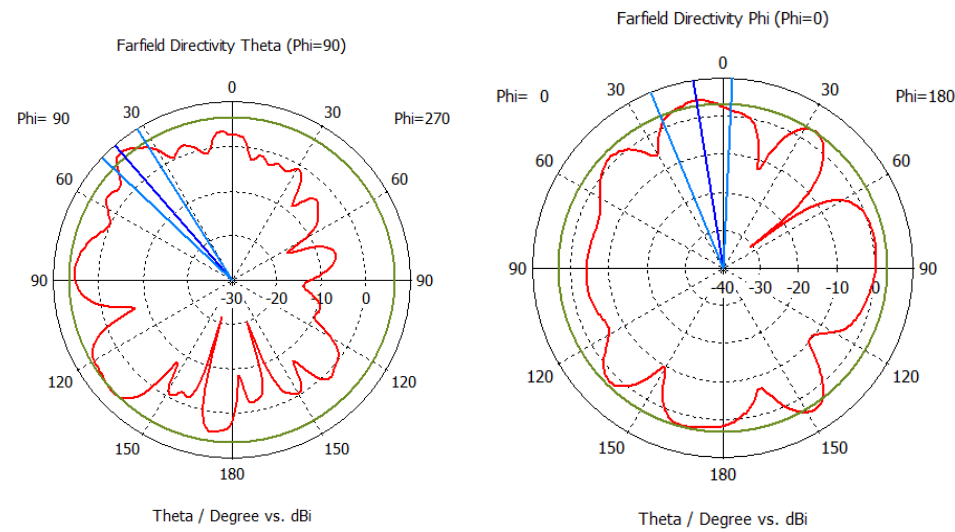


Figura A.15: 4 elementos - Diagramas de radiación del plano E y H respectivamente a 19 GHz

| Freq. | Plane E | | Plane H | |
|--------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) | Main Lobe Dir. | Ang. Width (3dB) |
| 4 GHz | 161 deg | 69.7 deg | 105 deg | 193.5 deg |
| 7 GHz | 128 deg | 51.7 deg | 180 deg | 81.5 deg |
| 10 GHz | 51 deg | 56.5 deg | 141 deg | 31.4 deg |
| 15 GHz | 143 deg | 28.1 deg | 119 deg | 20.6 deg |
| 19 GHz | 41 deg | 14.7 deg | 9 deg | 25 deg |

Tabla A.3: Antena MIMO de cuatro elementos (Ancho de haz y Dirección Lóbulo Principal).

En esta última observación, el ancho de haz va reduciéndose a medida que aumenta la frecuencia por el mismo motivo que en las dos antenas anteriores, sin embargo se destaca que el ancho de haz es mas pequeño en esta antena que en las anteriores en las frecuencias de interés por lo que se concluye que las ganancias que se tienen en las frecuencias de interés son mayores que las dos antenas anteriores. Se puede observar que la dirección del lóbulo principal es similar a las dos antenas anteriores en las frecuencias de interés.

Para el plano H a medida que aumenta la frecuencia va reduciéndose el ancho de haz.